

小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2019年3月18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、

- ・ 降下運用
- ・ 衝突装置 (SCI) 運用
- ・ 分離カメラ (DCAM3)
- ・ 衝突装置によるサイエンス

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. 降下運用
 3. 衝突装置運用
 4. 分離カメラ
 5. 衝突装置によるサイエンス
 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	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



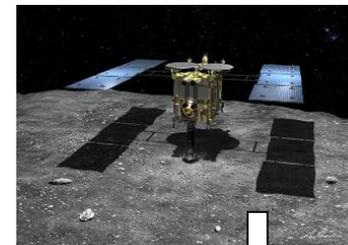
▲
地球スイングバイ
2015年12月3日

小惑星到着

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。



衝突装置放出



人工クレーターの生成

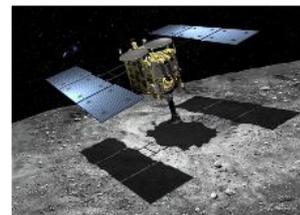
衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレーターを作る。

(イラスト 池下章裕氏)

地球帰還 ← 小惑星出発

2020年末ごろ

2019年11-12月



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。

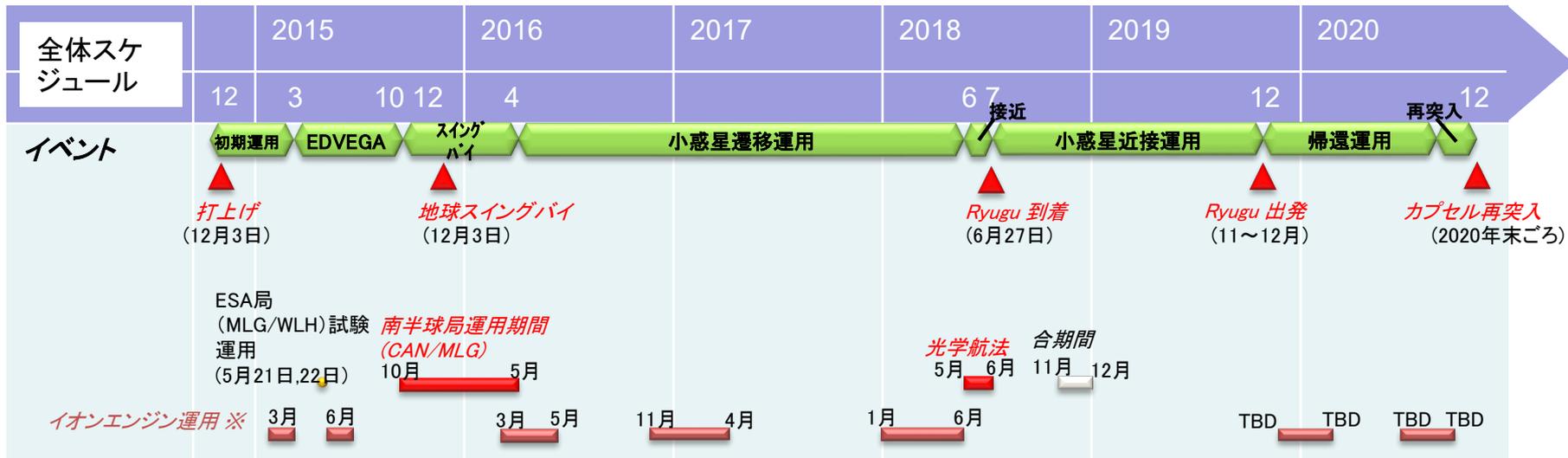


サンプル分析



1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

- 現状：
- 降下観測運用(D0-S01)を3月6日～8日に行い、高度22mからS01領域(タッチダウン候補地)の観測を行った。
 - 衝突装置運用に備えて、「クレーター探索運用(事前)」(CRA1)を3月20日～22日に行う。





2. 降下運用

■ 降下観測運用 (DO-S01)

- 低高度にてS01領域を調査する。
- 運用日程: 3月6日～8日 (実行済み)
- 高度22mまで降下

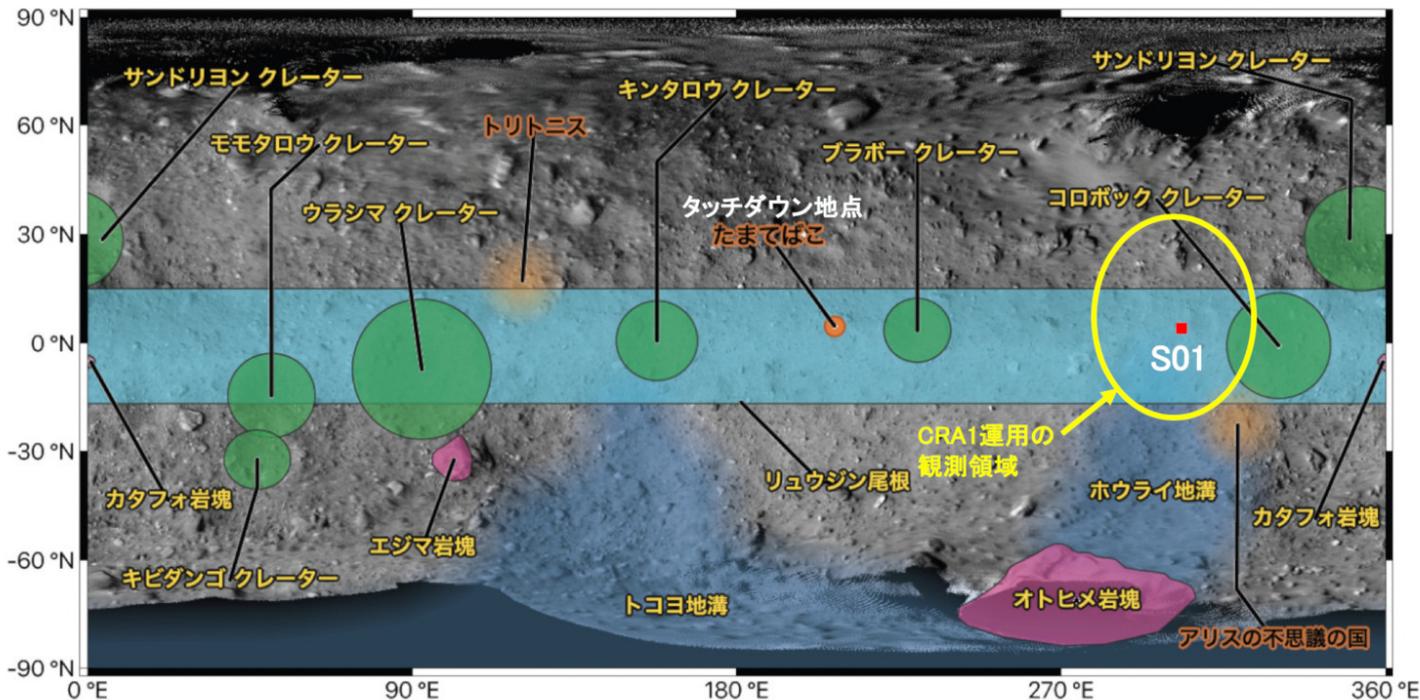
■ クレーター探索運用 (事前) (CRA1)

- 衝突装置 (SCI) でクレーターを生成する領域について事前に詳しいデータを取得する
- 運用日程: 3月20日～22日
- 最低高度は約1.7km



2. 降下運用

S01とCRA1の位置

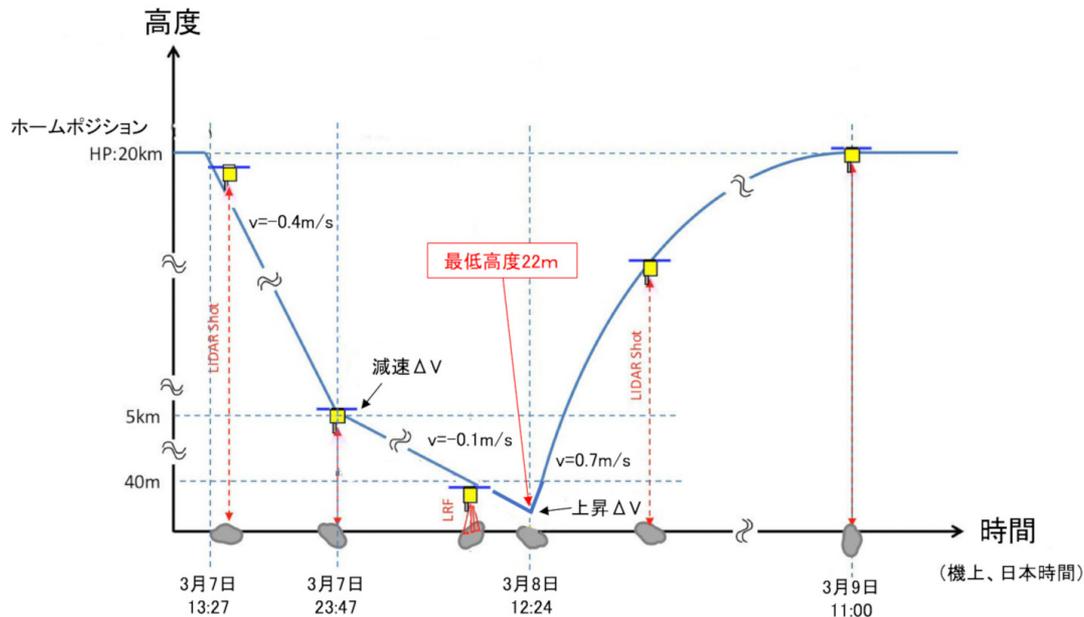


注) CRA1運用の観測領域は衝突装置によるクレーター生成領域と同じである。



2. 降下運用

降下観測運用(DO-S01)の結果



結果:

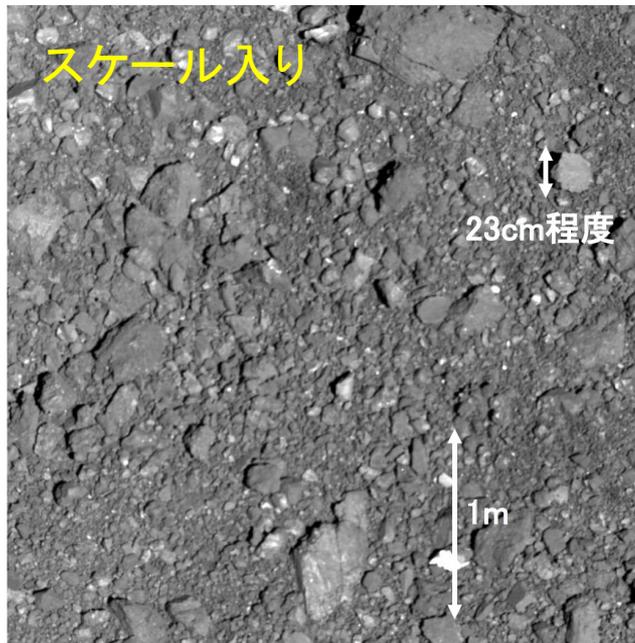
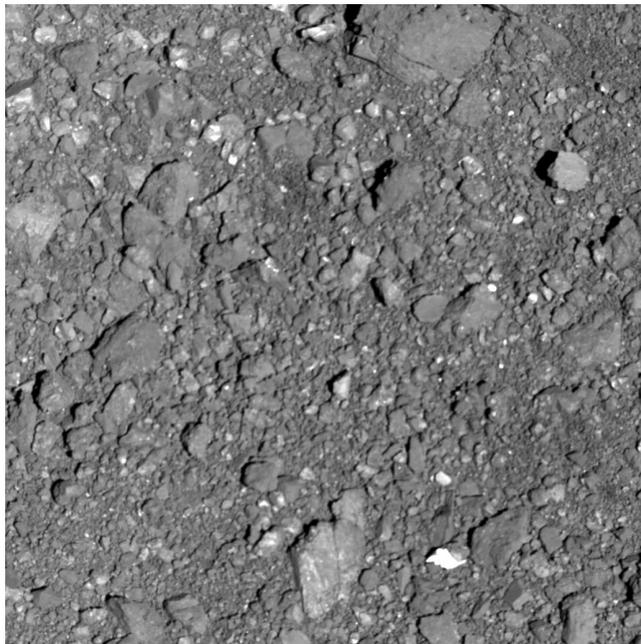
- S01の詳細なデータを得ることができた。現在解析中。
- ONC-W1については受光強度が半分ほどになり画像に汚れが見られた。他の機器については大きな異常はないものの、引き続き確認中。
- ONC-W1含め、タッチダウン以外の運用については問題なく使えることを確認した。



2. 降下運用

初公開

S01領域内を撮影した画像



DO-S01運用で撮影

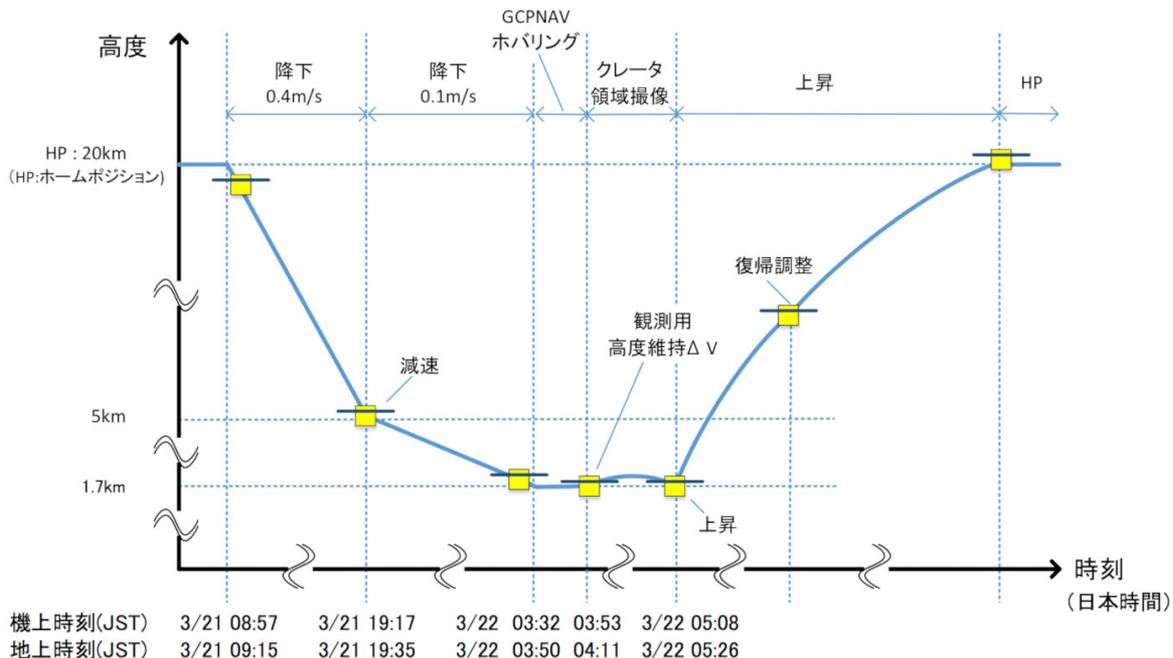
- ・カメラ: ONC-T
- ・撮影時刻(日本時間):
2019年3月8日 12:24
- ・撮影高度: 35m

(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. 降下運用

クレーター探索運用(事前) (CRA1)の計画



高度を約1.7kmに保ちながら、観測を行う。



3. 衝突装置運用

運用の概要・目的

- 衝突装置によってリュウグウ表面に人工的なクレーターを生成する。
- クレーター生成の様子や生成されたクレーターを調べることで、小惑星の内部についての情報を得る。
- 後日、生成したクレーター付近にタッチダウンをし、表層下の物質の採取を試みる。ただし、リュウグウ表面の状態がタッチダウンにとって危険である場合には、リスクを冒してまでタッチダウンを強行することはしない。

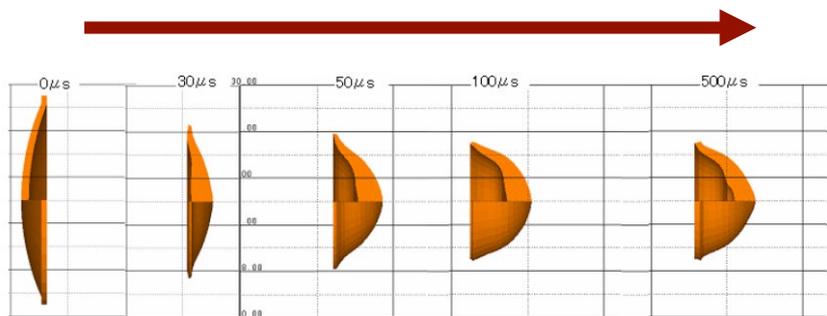
運用の日程

- SCI運用: 4月4日～6日
- クレーター生成日時: 4月5日 11:36(機上、日本時間)

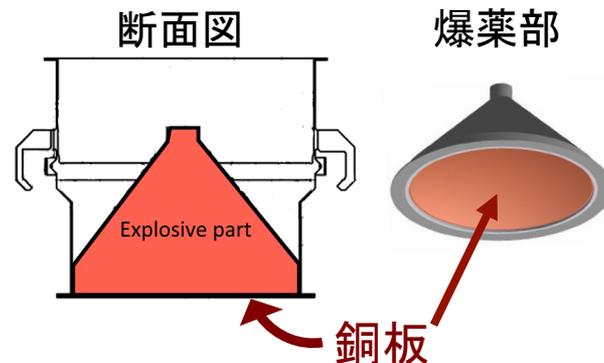
3. 衝突装置運用

衝突装置 (SCI: Small Carry-on Impactor)

- ◆ 形状: 円錐形(直径300mm、質量 14kg, 爆薬部: 約9.5kg)
- ◆ ライナ(衝突体となる部分): 純銅(2kg)、厚さ約5mm
- ◆ 爆薬: HMX系PBX(Plastic bonded explosive)
- ◆ 爆薬によりライナを約1/1000秒で2km/sに加速



銅板(ライナ)が変形しながら飛んでいく



3. 衝突装置運用

衝突装置 (SCI) の実験の様子 (2011年10月17~27日)



① 実験風景 (発火の瞬間)

高さ3mのコンクリートの壁に囲まれた発火地点(中央右)から、左下に向かって飛翔体が発射される様子。



② 飛翔体の形状

秒速約2kmで飛翔する様子。
外径約135mm、重量約2kg。
ヘルメット状に形成されている。



③ 打ち抜かれた的

飛翔体が的を打ち抜いた様子。発射地点から100m先の的(4m x 4m)に向かって単一の通過痕ができている。



④ 衝突の瞬間

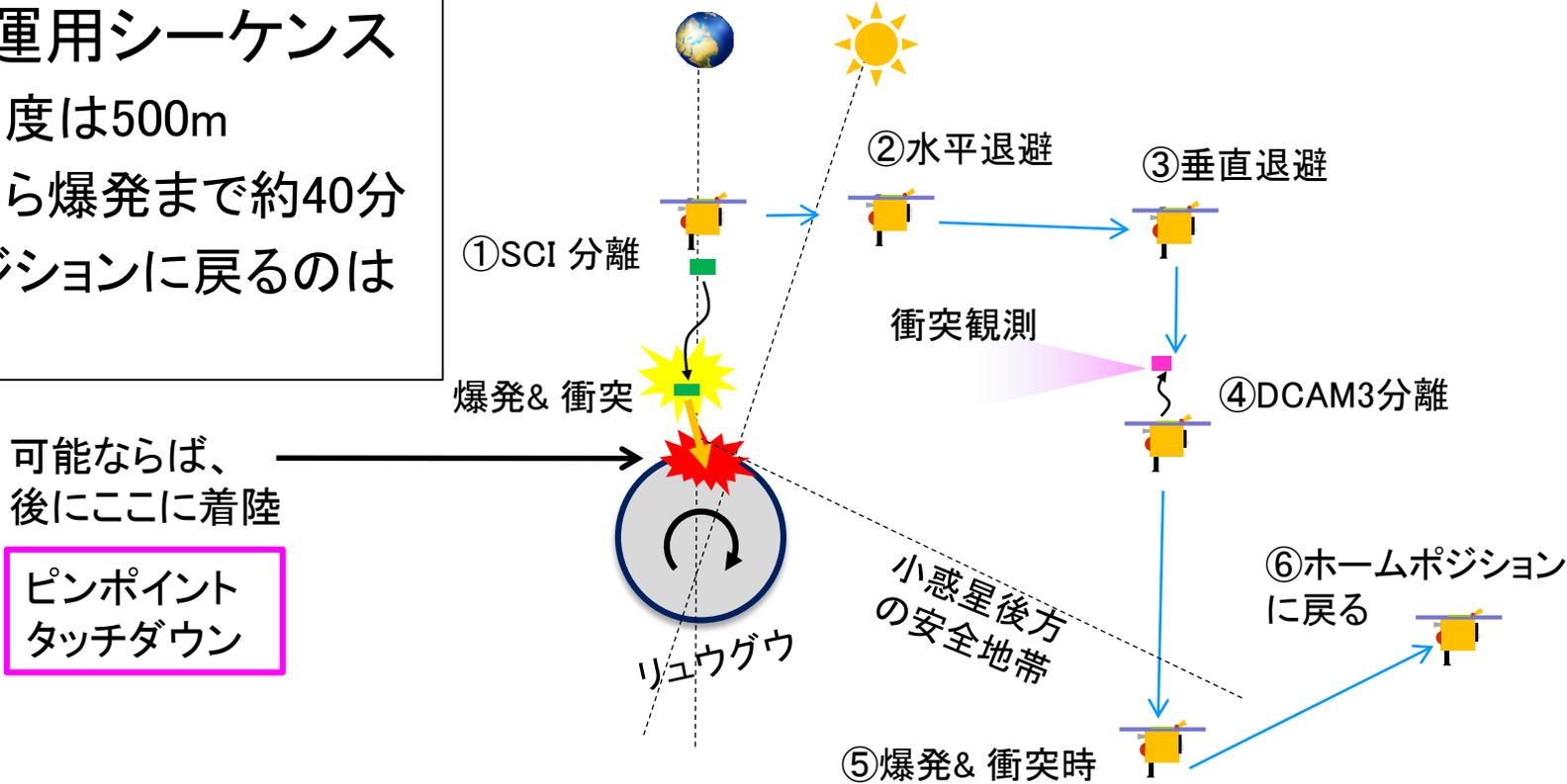
発射地点から100m先に設置された土砂ターゲットに飛翔体が衝突した瞬間の様子。



3. 衝突装置運用

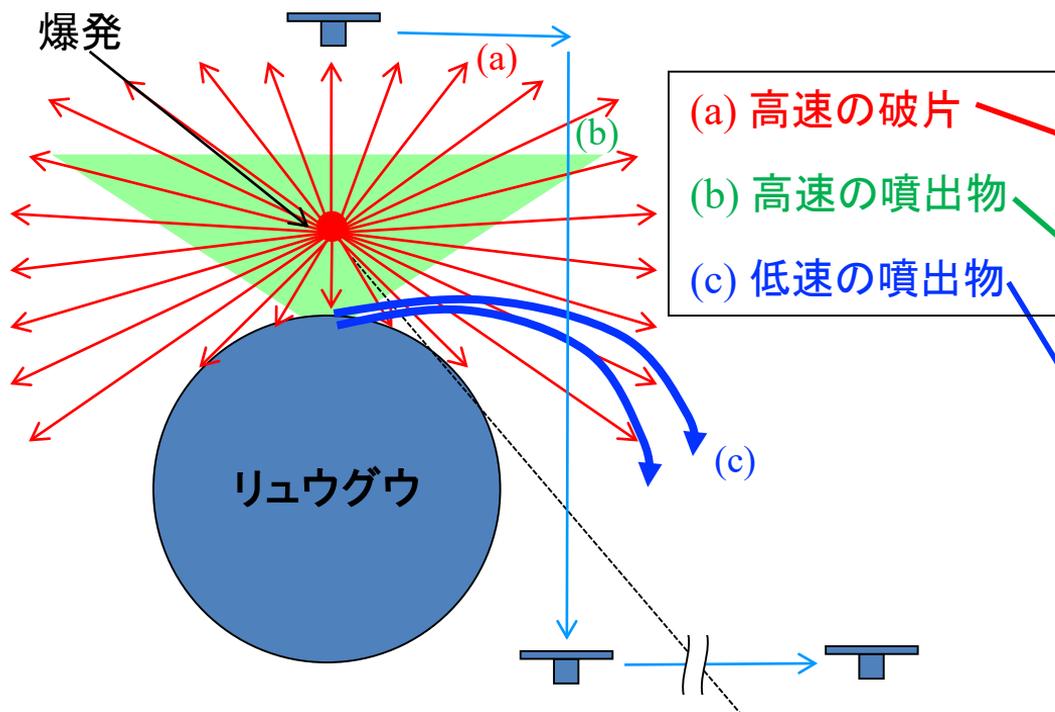
衝突装置運用シーケンス

- SCI分離高度は500m
- SCI分離から爆発まで約40分
- ホームポジションに戻るのは約2週間後



3. 衝突装置運用

デブリとイジェクタの回避方法



- (a) 高速の破片
- (b) 高速の噴出物
- (c) 低速の噴出物

① デブリ回避
搭載型衝突機の起爆時に飛散するデブリは小惑星の影で回避

② 高速イジェクタ回避
衝突体衝突時に発生する高速イジェクタは①とともに小惑星の影で回避

③ 低速イジェクタ回避
軌道運動を行って回り込んでくる低速イジェクタは小惑星との距離をとることで回避。超高高度まで飛散する低速イジェクタは速度が小さいため衝突の影響は小さいうえに、衝突確率は低い



3. 衝突装置運用



衝突目標点設定とその理由

制約条件

SCI運用時のサブアース緯度(～北緯6°)を目標点とすること(衝突予測領域は3σで半径約200m = 緯度経度で約±30°の範囲)。

目標点の選定基準

第1優先: 見つかるクレータを作れる場所であること。

第2優先: 着陸可能なエリアであること。

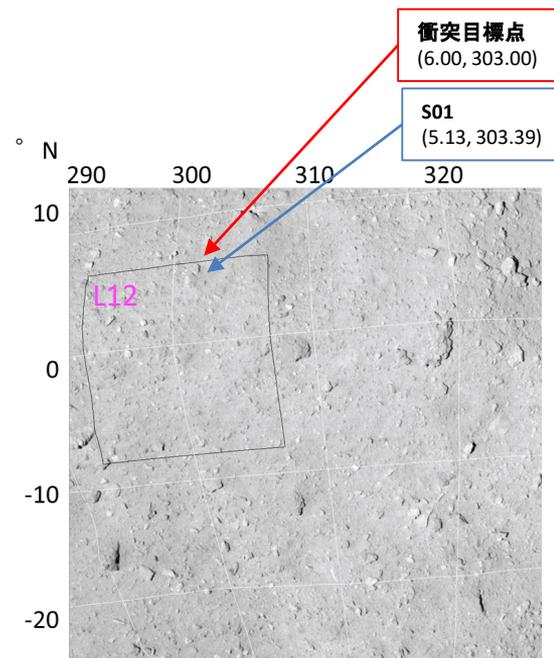
→平坦かつ細粒層の領域が望ましい。

衝突目標点緯度経度 (6.00° , 303.00°)

平坦領域L12 (TD有力次点候補S01)近辺であり、周囲に平坦領域が散在。

TD1とは別の地域(ホウライ地溝や東側半球)の試料を採取できる可能性。

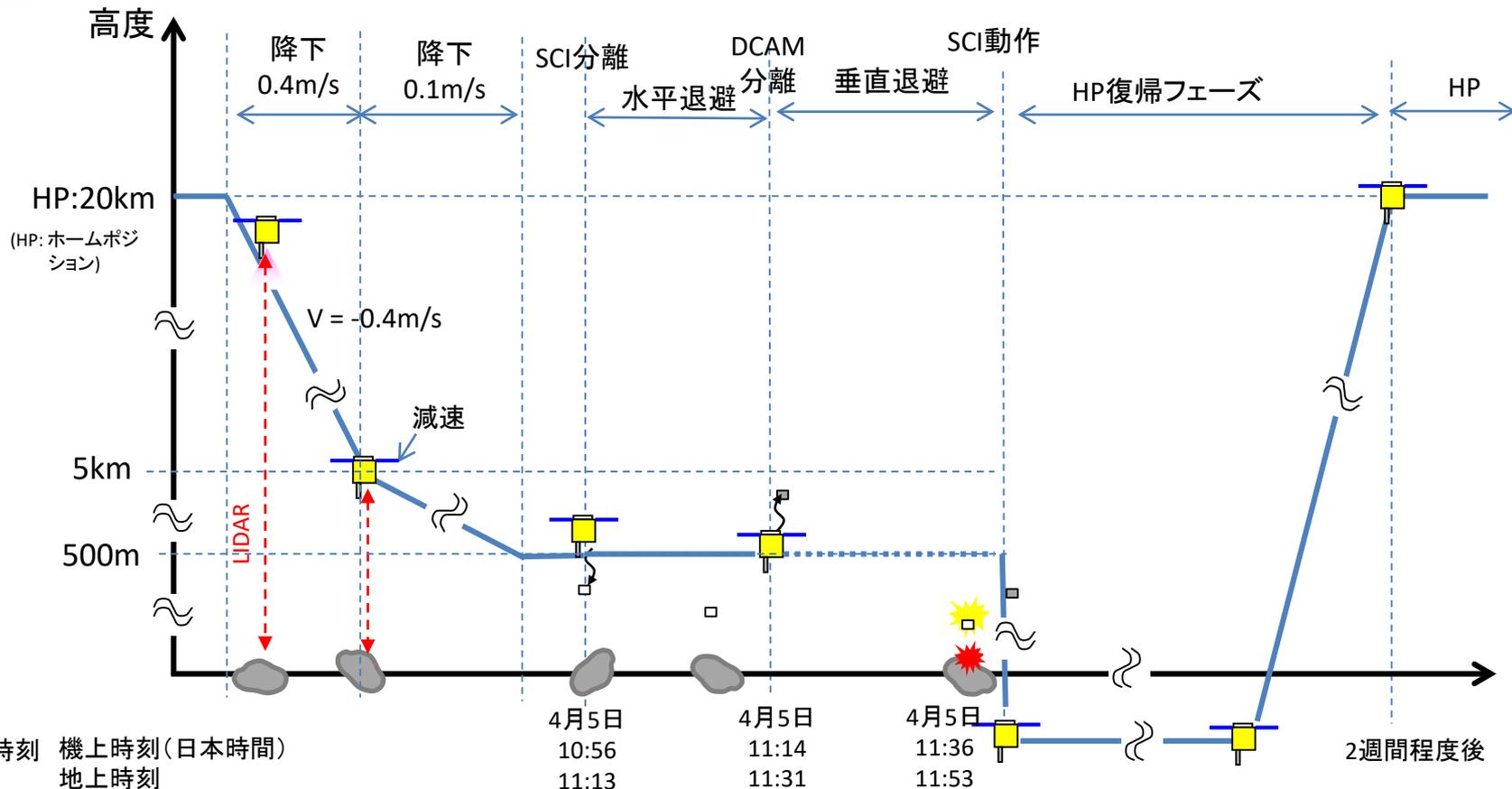
TD1とよく似た地質領域であり、掘削試料採取によりTD1試料と比較することで物質・構造の深さ分布について議論可能。



MASCOT投下のためのホバリング時ONC-Tにより撮像(高度約3km)



3. 衝突装置運用



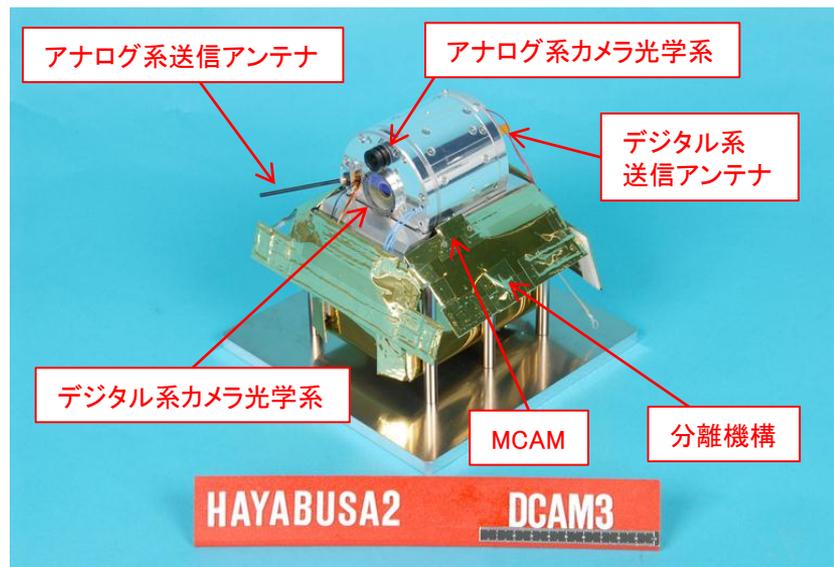


4. 分離カメラ

分離カメラ(DCAM3)の概要

- 分離カメラ部はレンズ、アンテナの突起を除いて、 $\Phi 80 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ の円筒形状。
- 低分解能だがリアルタイムで映像を送れるアナログカメラと高解像画像をデジタル通信するデジタルカメラの2台が内蔵。
- 画像送信機・送信アンテナもアナログ系、デジタル系、それぞれが搭載されている。
- バッテリにより最長で3時間の撮像と無線データ送信が可能(条件による)。
- 10 km 以上離れても無線で母船に画像送信が可能。
- 分離機構に搭載する小型モニタカメラ(MCAM)がDCAM3 が分離して離れていく様子の撮影を試みる。

DCAM3 = Deployable Camera 3
ソーラー電力セイル「IKAROS」搭載の
DCAM1、DCAM2 の後継機

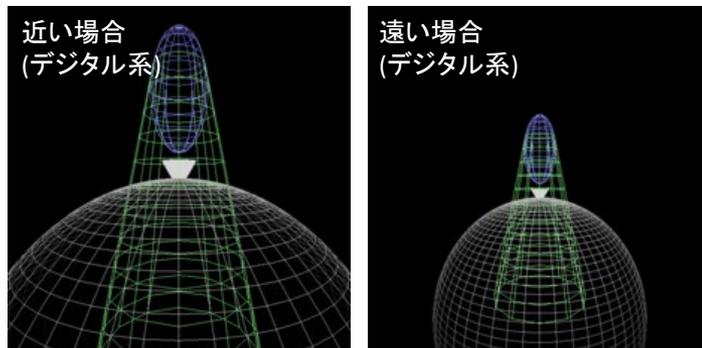




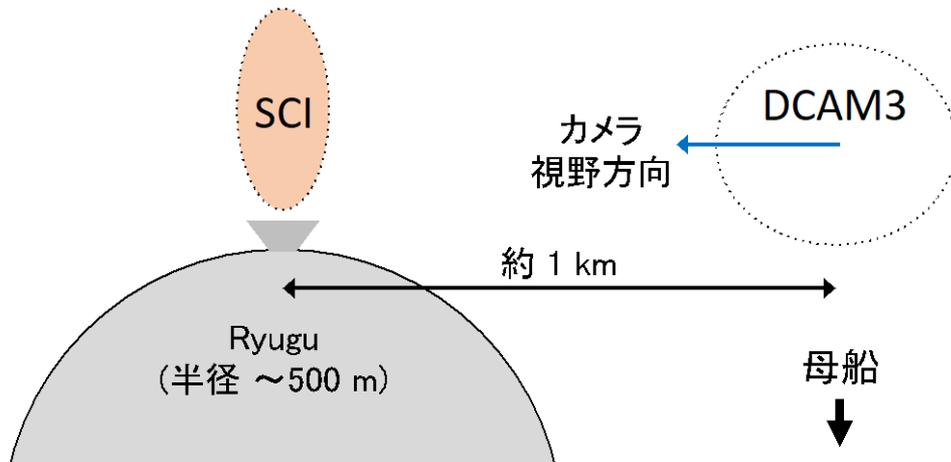
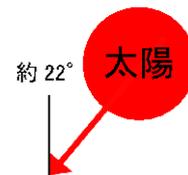
4. 分離カメラ

分離カメラ(DCAM3)の観測の概要

- 約 1 km 遠方から、衝突現象を観測する。
 - 小惑星本体
 - 衝突の際に発生する飛散物
 - 高速破片 (デジタル系のみ)
 - 低速ダスト (デジタル系のみ)
 - 起爆前の SCI 本体 (デジタル系のみ)
- アナログ系: カラー、視野角 $71^\circ \times 53^\circ$ 、
720x526 ピクセル、分解能 約 10 m
- デジタル系: モノクロ、視野角 $74^\circ \times 74^\circ$ 、
2000x2000 ピクセル、分解能 約 1 m
- アナログ系はリアルタイムで母船へデータを送信する。デジタル系は遅延して送信。



(Ogawa et al., Space Sci. Rev. 208, 125-142, 2017)





5. 衝突装置によるサイエンス

衝突成長・破壊を繰り返す天体形成進化の理解へ

• リュウグウ表面でどのような衝突クレータがどのようにできるか/できないか？

- クレータ形成過程の観測と形成クレータサイズ・形状の測定
 - 本物の小惑星物質・環境における衝突実験による衝突物理モデル(スケーリング則)の構築
 - リュウグウの衝突史・表面年代推定(クレータ年代学)のためのスケーリング則の構築

スケーリング則: 衝突条件と形成クレータ諸量をつなぐ普遍的な関係式。

• リュウグウの“地下”はどうなっているのか？

- クレータ形成による地下物質の暴露・採取 → 宇宙風化・表層流動の影響評価
- **掘削放出物(イジェクタ)のその場観測** → 地下の状態(空隙率, 粒径分布など)を推定

DCAM3の活躍

• リュウグウ表層は動きやすいのか？

- 衝突の際の地形変化等を計測 → 衝突振動の影響、小さいクレータが少ないことの理解へ

• 岩塊に衝突した場合は…

- 岩塊上のクレータ計測あるいは岩塊破壊の破片計測 → 小惑星物質の強度推定

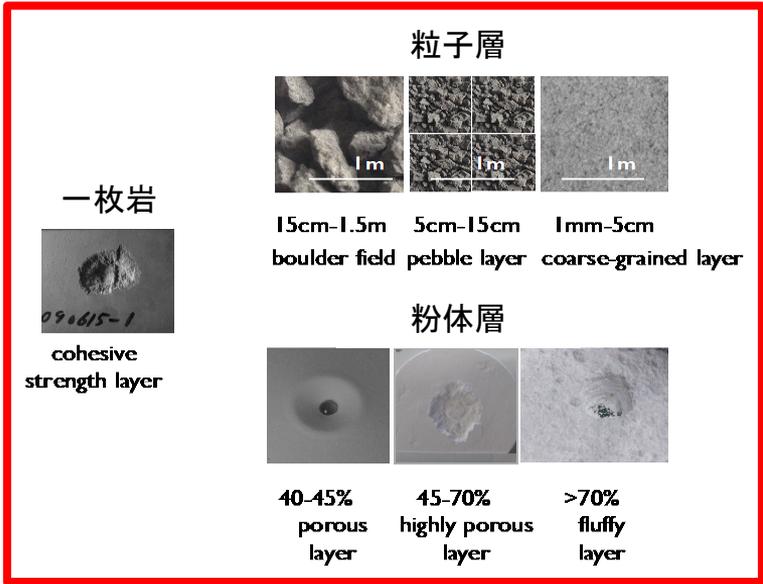


5. 衝突装置によるサイエンス



予想されるクレータサイズ

分類	細分類	クレータ直径	イジェクタ堆積層直径 ※	適用スケーリング則 ※※
一枚岩 >1.5m	強度層 空隙率<40%	70 cm - 10 m	-	強度支配
粒子層 粒径1mm-1.5m	ガレ場 粒径15cm-1.5m	< 15 cm - 1 m	-	強度支配
	小石場 粒径5-15cm	2 - 10 m	4 m - > 20m	重力支配
	砂場 粒径1mm- 5cm	2 - > 10 m	4 m - > 20 m	重力支配
粉体層 粒径<1mm	空隙率40-45%	1 - 10 m	2 m - > 20 m	重力+強度支配
	空隙率45-75%	30 cm - 1m	60 cm - 2 m ?	重力+強度支配
	空隙率>75%	< 40 cm	-	重力+強度支配



※クレータ周囲に堆積する明瞭なイジェクタ層の広がり。

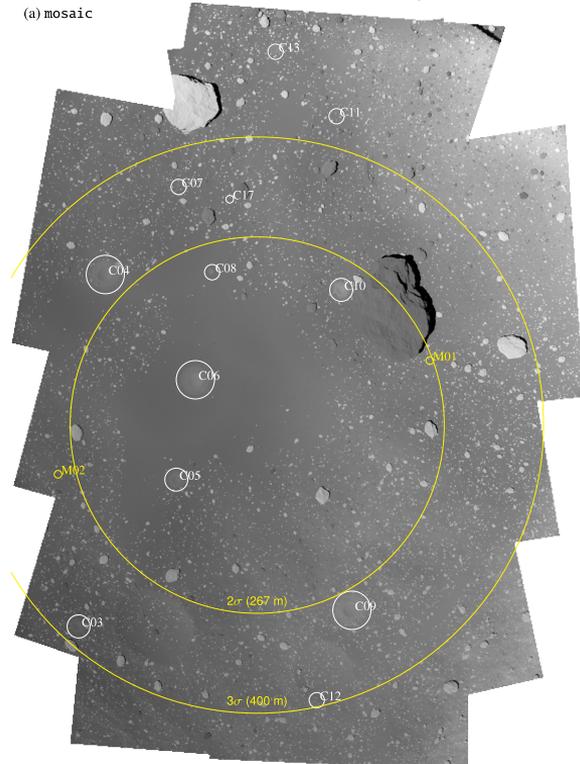
※※クレータ形成に際して標的の強度と重力のどちらが支配的かで適用するスケーリング則が変わる。



5. 衝突装置によるサイエンス

クレータ探索: 基本的に“目”でみて探す

- DCAM3撮像→着弾位置を推定
- ONC, TIRによる事前事後低高度撮像(CRA1, 2)比較→着弾位置・クレータ同定
 - 衝突の2週間前と3週間後に衝突予測領域を低高度スキャン撮像
 - ONC-Tの解像度: ~17cm/pix@高度1.7km
 - TIRの解像度: ~1.7m/pix@高度1.7km
- ONC-W1等によるSCI分離時撮像→SCI分離確認・爆破位置推定
- そのほか, TIRやLIDARによるSCI衝突後のダスト観測など→衝突確認



クレータ探索訓練より
(ONC-T画像モザイク)



6. その他



■ 海外での発表

- ・米国での研究集会であるLPSC (The 50th Lunar and Planetary Science Conference) で、「はやぶさ2」の特別セッションおよび現地メディア向け説明会を行う。
- ・期日・場所: 3月18日～22日、米国、テキサス、ザ・ウッドランド
- ・「はやぶさ2」の特別セッション: 口頭 (3/19) 13件、ポスター (3/20) 28件
- ・さらに別のセッションにおいて「はやぶさ2」に関連した数件の発表あり
- ・現地メディア向け説明会は3月19日、11:45～12:30 (現地時間) で行われる予定で、内容はタッチダウンについての説明とサイエンスの結果についてである。



7. 今後の予定

■ 運用の予定

- 3月20～22日：クレーター探索運用（事前）（CRA1）
- 4月4日～6日：衝突装置運用（SCI）

■ 記者説明会等

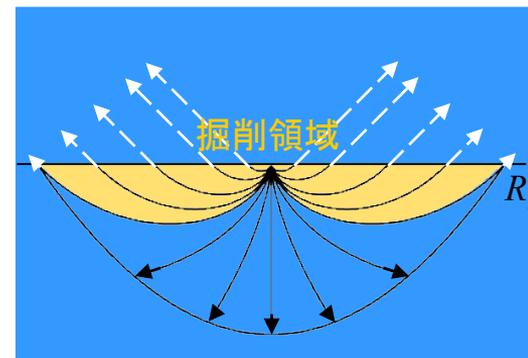
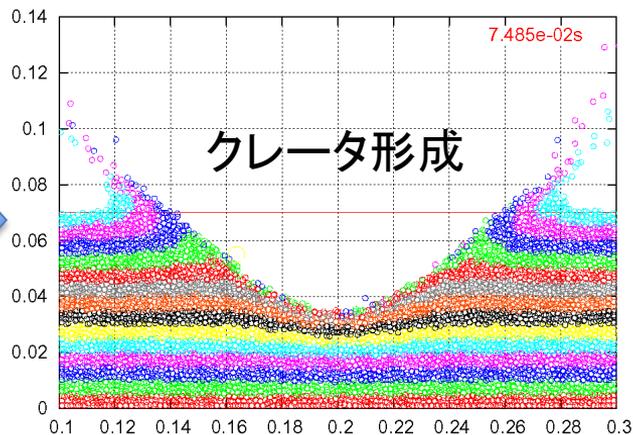
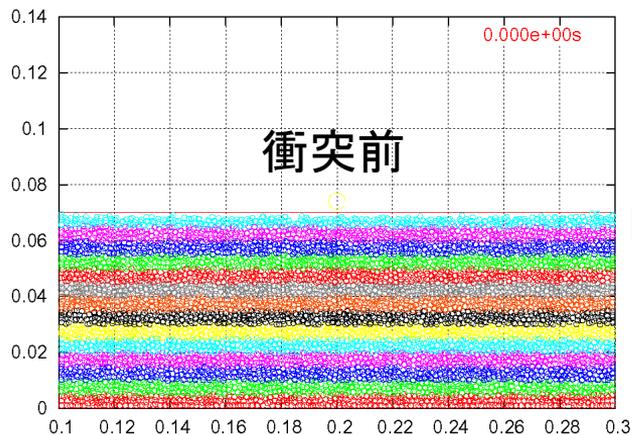
- 4月2日 14:00～ 定例記者説明会@JAXA東京事務所
- 4月5日 8:30～ プレスセンター開設@JAXA相模原キャンパス



参考資料

クレータ掘削深さ

- 掘削領域(Excavation region)の深さは、クレータ直径の1/10程度。



掘削モデル

砂への衝突によるクレータ形成の数値シミュレーションの例。色は衝突前の深さに対応。(提供:和田浩二)



衝突実験で見られるイジェクタの放出の様子



岩塊

粉体(砂)層

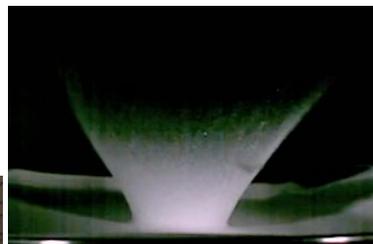
高空隙層



玄武岩: P=0%



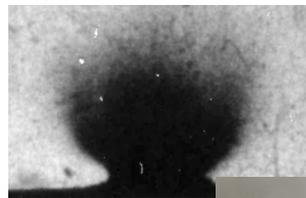
強度



ガラスビーズ(100 μ m): P=40%



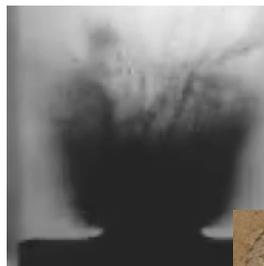
空隙率



石膏: P=50%



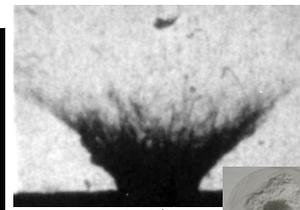
強度



モルタル: P=20%
衝突速度: 4km/s
 Φ 7mm, ナイロン

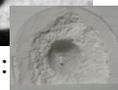


パーライト(3mm): P=80%
衝突速度: 90 m/s
 Φ 3mm, アルミ



空隙シリカダスト:
P=65%

衝突速度: 3.2km/s
 Φ 2mm, ナイロン



P: 空隙率
 ϕ : 弾丸径

提供: 神戸大学荒川研究室



イジェクタ(カーテン)の規模と時間変化予測



砂(重力支配)への衝突の場合

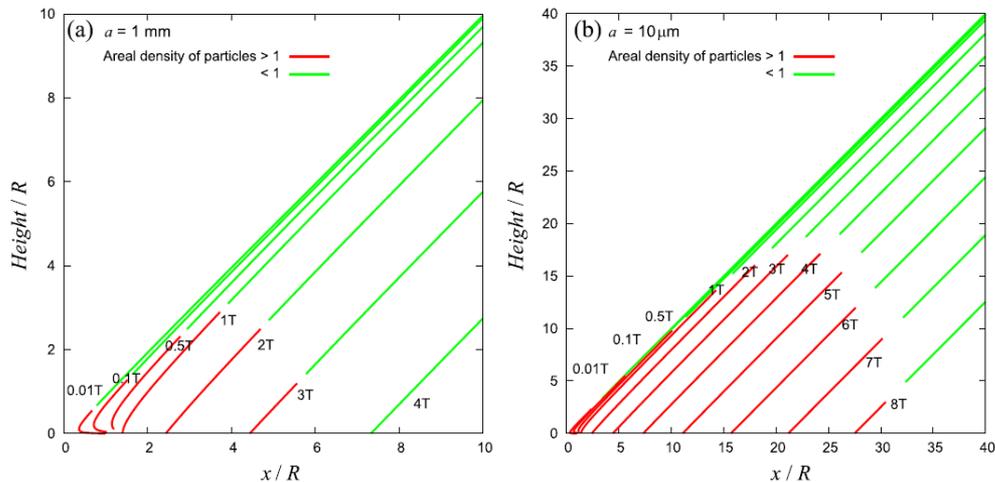


Fig. 6 The cross section of the ejecta curtain proceeding with time, assuming a typical sand target ($C_2 = 0.64$ and $\mu = 0.41$), and the radius of constituent ejecta particles is (a) 1 mm and (b) 10 μm . The horizontal axis shows the distance x from the impact point and the vertical axis shows the height from the target surface, both being normalized by the final crater radius R . The time labeled for each curtain is normalized by the crater growth time $T = 0.92(R/g)^{1/2}$ for a typical sand target, where g is the surface gravity (Holsapple and Housen 2007). With g and R being $2.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ and 5 m, respectively, T is calculated to be 128 sec. The red lines show a dense part of curtains with an areal density of particles > 1 , while the green lines show a sparse part

(Arakawa et al. 2017)

岩盤(強度支配)への衝突の場合

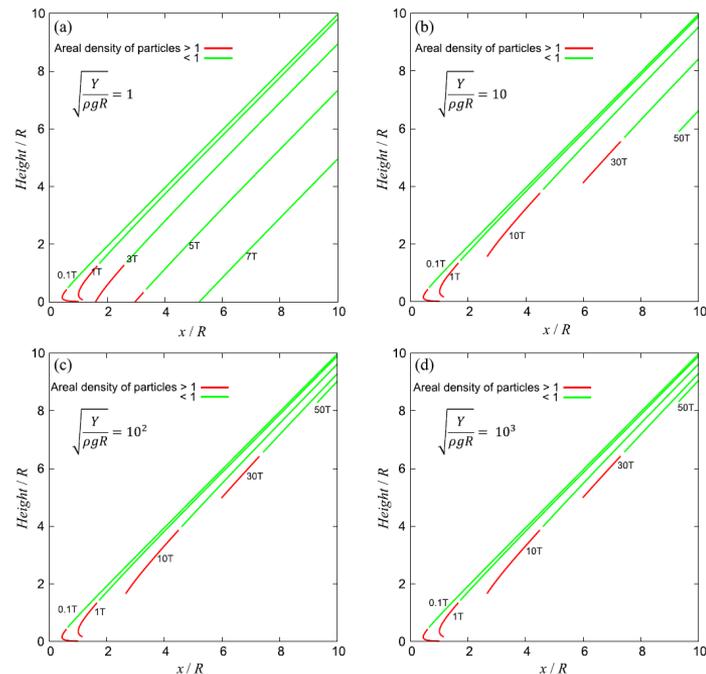
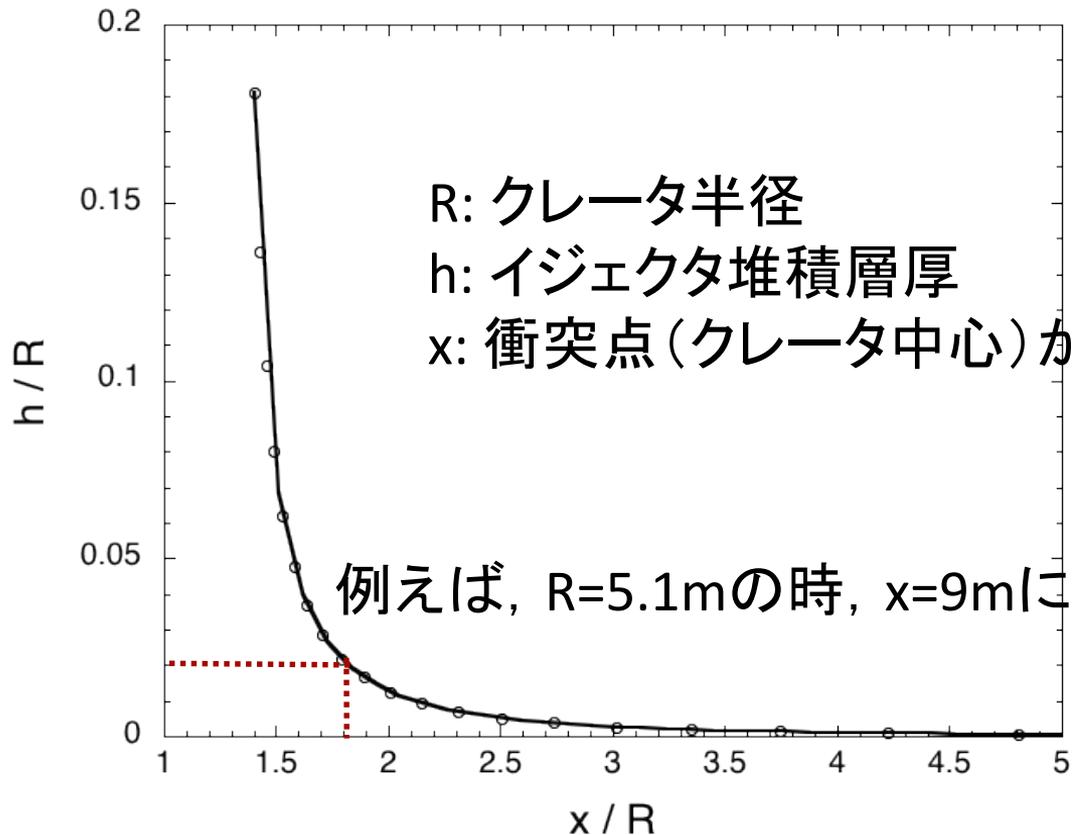


Fig. 11 Same as Fig. 6, but assuming the strength regime scaling law with parameters of $C_3 = 0.53$ and $\mu = 0.55$ (Housen and Holsapple 2011). The ejecta curtains proceed differently, depending on the target strength Y with $(Y/\rho g R)^{1/2} =$ (a) 1, (b) 10, (c) 100, and (d) 1000. The crater growth time T is given by $T = 0.44R/(Y/\rho)^{1/2}$ for a typical rock target (Holsapple and Housen 2007). Here we assume $R = 1\text{m}$, then (a) $T = 27.3$ sec, (b) 2.73 sec, (c) 0.273 sec, and (d) 0.0273 sec. When giving the areal density of curtains, we assume the radius of the constituent ejecta particles to be 1 mm



イジェクタ堆積層厚分布予測(砂への衝突の場合)





リュウグウ地下構造(変成度)予想



表層が流動していないとして...

変成原因	層厚(深さ)
太陽風による宇宙風化	数ミクロン
太陽光加熱による熱変成	数10 cm
銀河宇宙線による宇宙風化	~ 1 m
変成なし(新鮮)	> 1 m

表層が流動(混合)しているとするると変成度は深さに寄らない？