

はやぶさ2の小惑星Ryuguへのタッチダウンにおける  
画像航法誘導制御  
～ 自律制御と手動制御 ～

神奈川工科大学 機械工学科 航空宇宙学コース  
元:宇宙航空研究開発機構 はやぶさ2プロジェクトチーム  
照井 冬人 *A. Terada*



## 概要



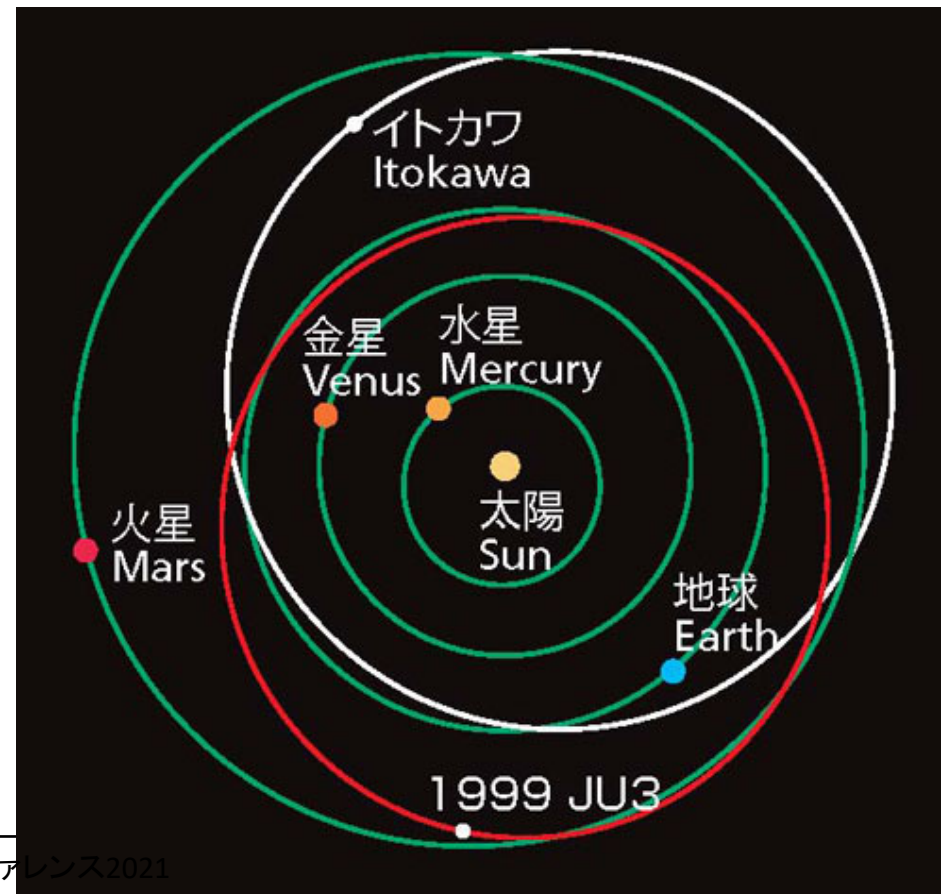
1. はやぶさ2 運用の流れ、工学成果、航法・誘導・制御機器
2. 小惑星Ryugu到着後：小惑星近傍フェーズ 事前計画と厳しい現実
3. 小惑星Ryugu到着後：小惑星近傍フェーズ タッチダウン制御戦略
4. 2019/02/22 第1回タッチダウン着陸地選定
5. 2019/02/22 第1回タッチダウン運用計画
6. 2019/02/22 第1回タッチダウン運用結果
7. Ryuguにタッチダウンする際の課題、自律制御と手動制御
8. 2019/04/06 SCI分離運用
9. 2019/07/11 第2回タッチダウン着陸地選定・運用結果
10. 地球帰還
11. 拡張ミッション



## 「はやぶさ2」のターゲット天体:リュウグウ



- 炭素を多く含む炭素質小惑星
- 元々の名前は **1999JU3**
  - 1999年に発見された
- 周期的に地球に近づく
  - 軌道を乗り換えしやすい





# はやぶさ2 運用の流れ



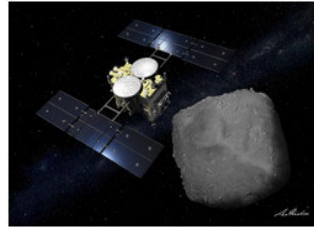
打ち上げ  
2014年12月3日



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-II1分離  
2018年9月21日



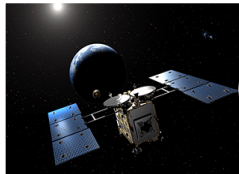
MASCOT分離  
2018年10月3日



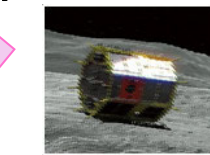
ターゲットマーカ分離  
2018年10月25日



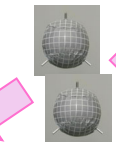
リュウグウ出発  
2019年11月13日



地球帰還  
2020年12月6日



MINERVA-II2  
2019年10月3日

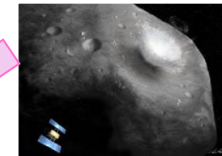


ターゲットマーカ分離  
2019年9月17日

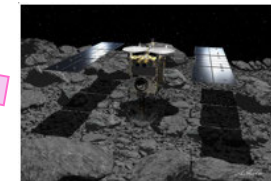


第2回タッチダウン  
2019年7月11日

ターゲットマーカ分離  
2019年5月30日



衝突装置  
2019年4月5日



第1回タッチダウン  
2019年2月22日



## はやぶさ2 フライトモデル完成



2014年8月31日 : JAXA相模原キャンパス

2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



## ロケット搭載時のはやぶさ2

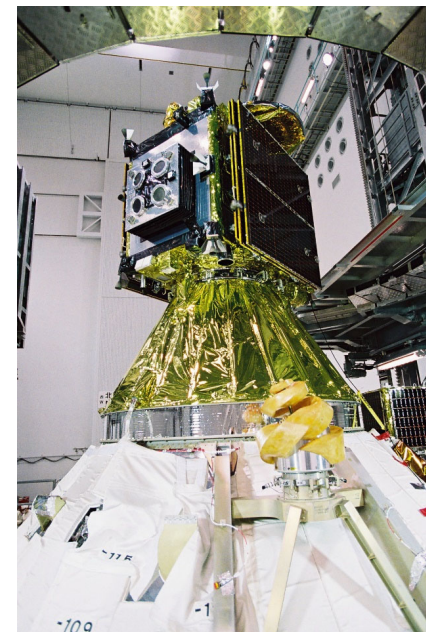


ロケットファリング結合



はやぶさ2と小型副ペイロード

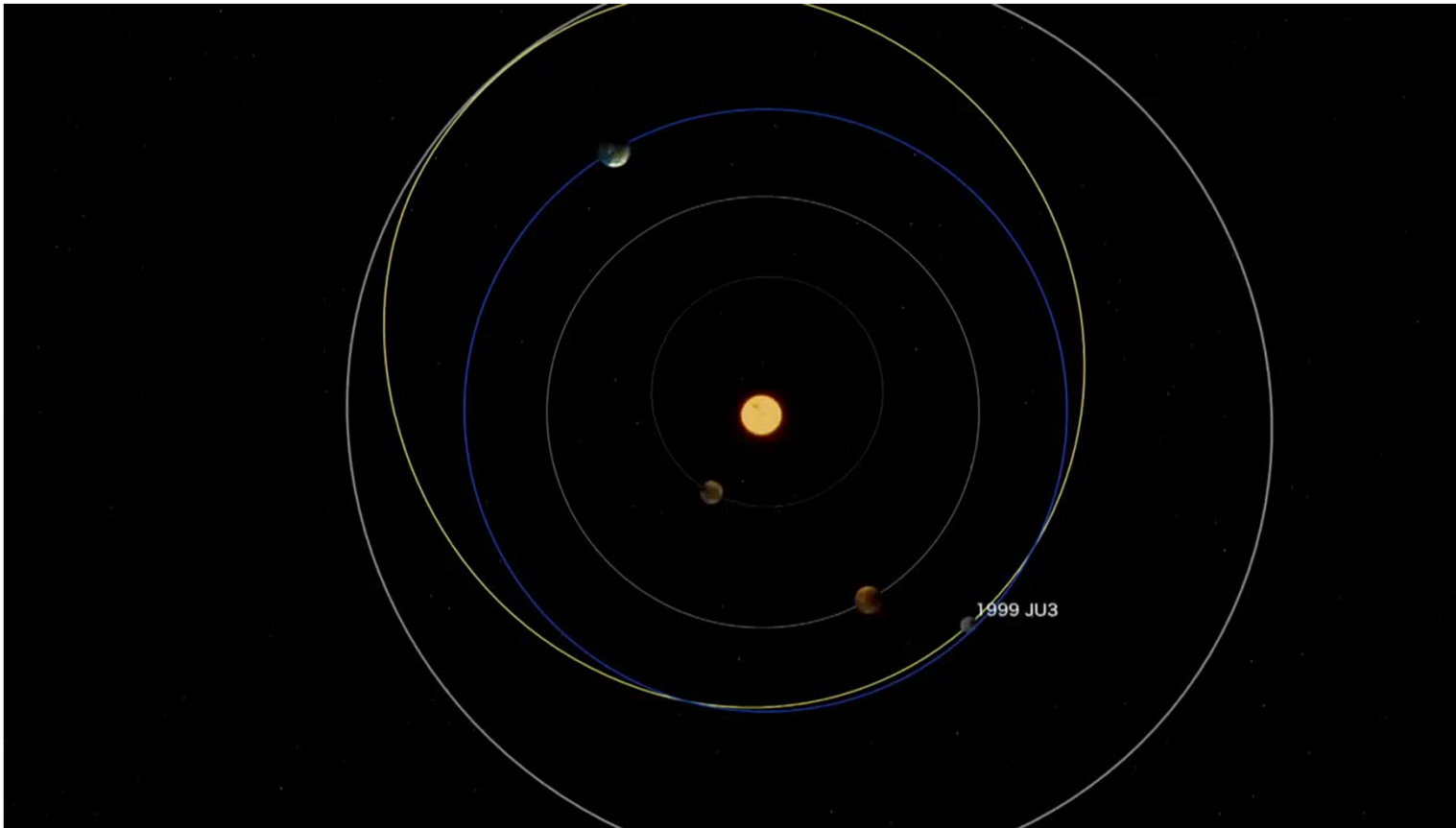
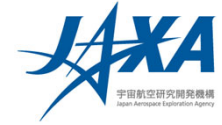
- しんえん2(九州工業大学)
- ARTSAT2-DESPATCH(多摩美術大学)
- PROCYON(東京大学・JAXAとの共同研究)



2014年11月:種子島



CG : 打上 → 探査機分離 → 小惑星到着 → 地球帰還

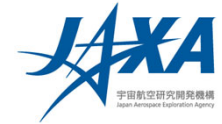


2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



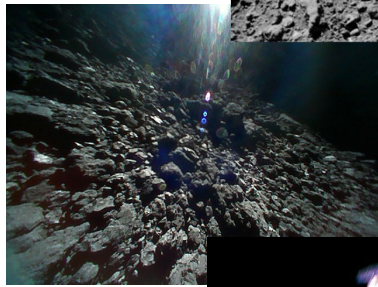
# はやぶさ2 工学成果 1/2



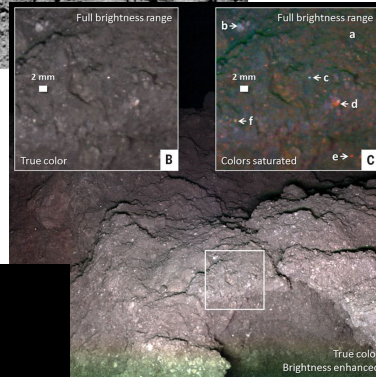
## 7つの「世界初」

1. ロバーによる小天体表面の移動探査
2. 複数ローバーの小天体上への投下・展開

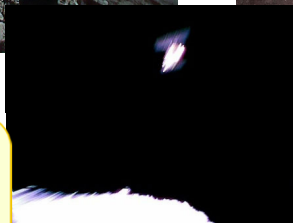
MASCOT taken by ONC-W2



MINERVA-II-1A image



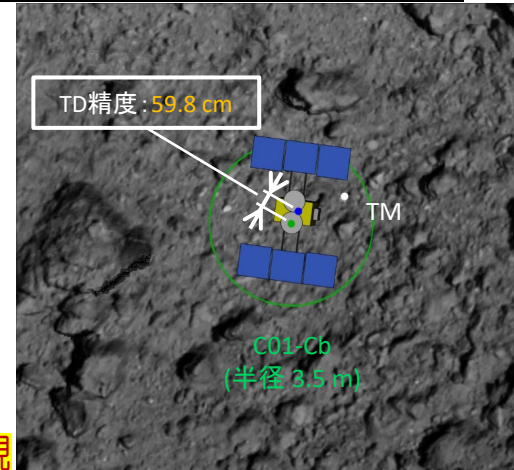
MASCOT images



MINERVA-II-1A image



CAM-H image at TD1 operation



TD2 Landing Accuracy

**MASCOT**  
DLRとCNES製作

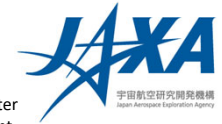
**MINERVA2**  
II-1A II-1B II-2  
II-1: JAXA MINERVA-IIチームによる  
II-2: 東北大およびミネルバ2コンソーシアムによる

## 3. 着陸精度60cmの実現





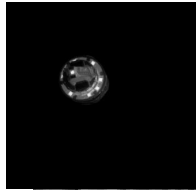
# はやぶさ2 工学成果 2/2



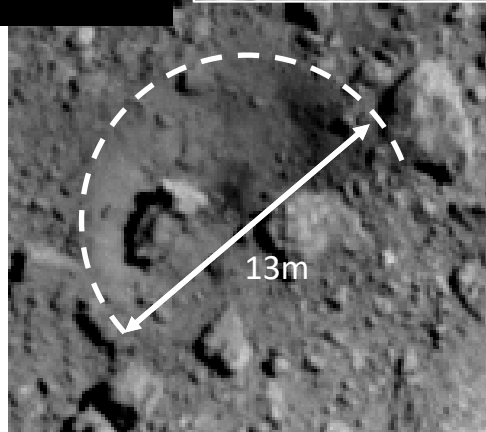
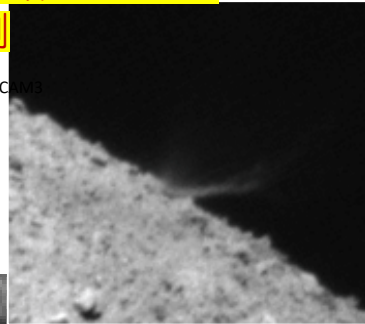
## 7つの「世界初」

### 4. 人工クレータの作成とその過程の詳細観測

Deployed SCI taken by ONC-W1

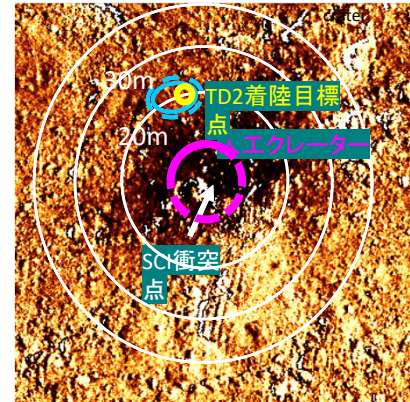


Impact ejecta observed by DCAM

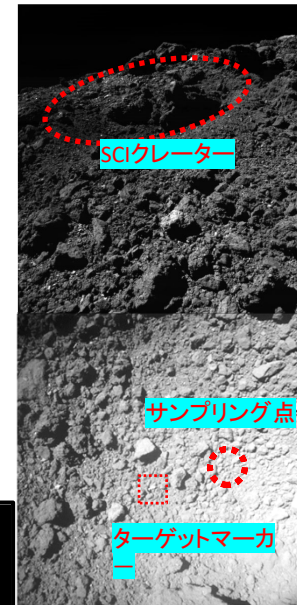
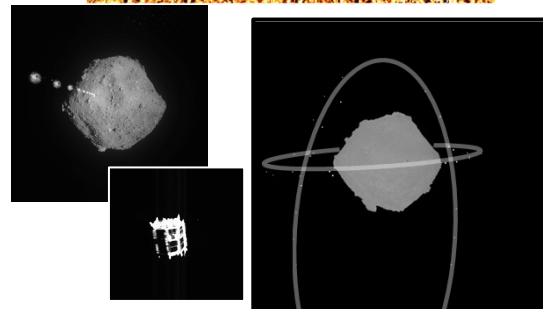


Artificial crater generated by SCI

### 5. 同一天体2地点からのサンプル採取 6. 地下物質の採取



Accumulation of Impact ejecta around artificial crater

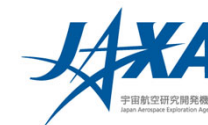


Artificial crater and TD2 point in one view

### 7. 小天体まわりの最小コンステレーションの実現



## はやぶさ2 姿勢軌道制御サブシステム関連機器



### 搭載計算機:

- 2 オンボードコンピュータ(AOCP-A,B)
- 2 画像保存・処理用コンピュータ (ONC-E/DE)

### アクチュエータ:

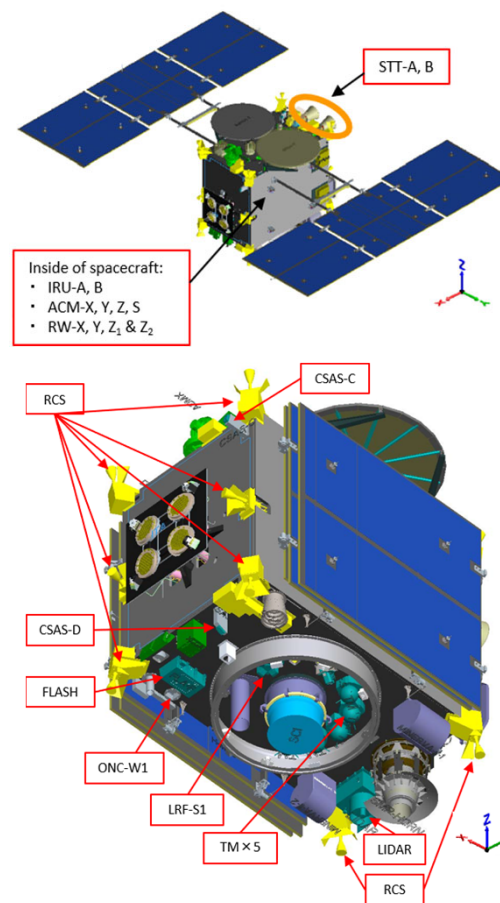
- 12 スラスタ (RCS-A(odd),B(even))
- 4 リアクションホイール (RW-X,Y,Z<sub>1</sub>,Z<sub>2</sub>)

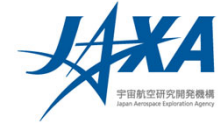
### センサ:

- 2 スターセンサ (STT-A,B)
- 2 ジャイロセンサ (IRU-A,B)  
(3-axis 角速度センサ)
- 航法カメラ (ONC-W1)
- Laser Range Finder (LRF-S1)  
(近距離用 4 ビームレーザーセンサ)
- Light Detection and Ranging (LIDAR)  
(遠距離用 1ビームレーザーセンサ)
- 4 加速度計 (ACM-X,Y,Z,S)

### その他:

- 5 ターゲットマーカ (TM)
- フラッシュランプ(FLA)



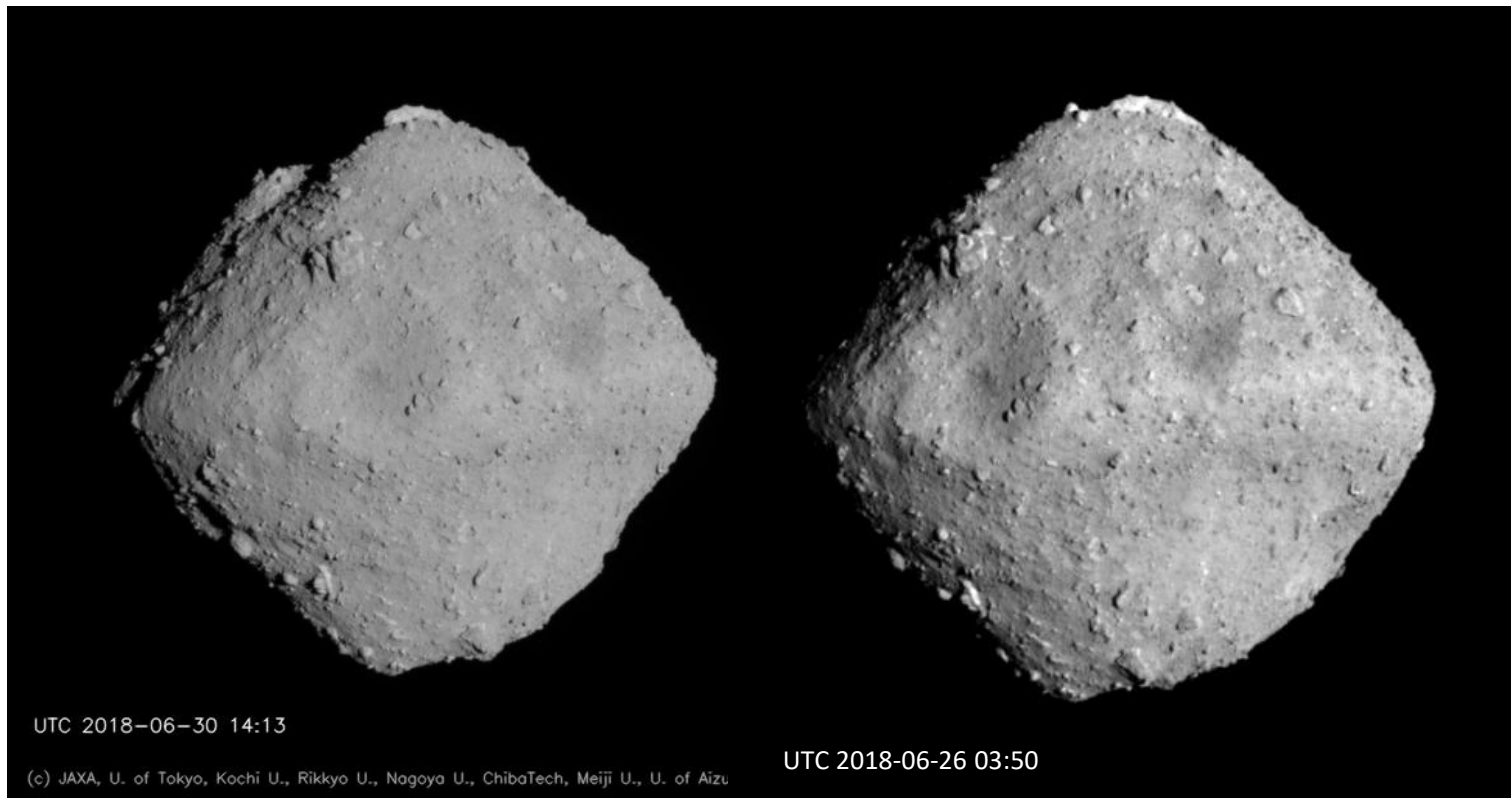
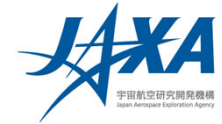


# 小惑星Ryugu到着後 :小惑星近傍フェーズ 事前計画と厳しい現実



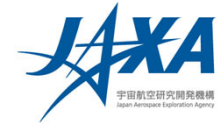
## 見えてきたRyuguの姿

- ・きわめて暗い表面、直径約900m、自転軸方向は軌道面に垂直に近い、自転周期7.6時間
- ・クレーター、多数の岩塊(130 mの大岩含む)

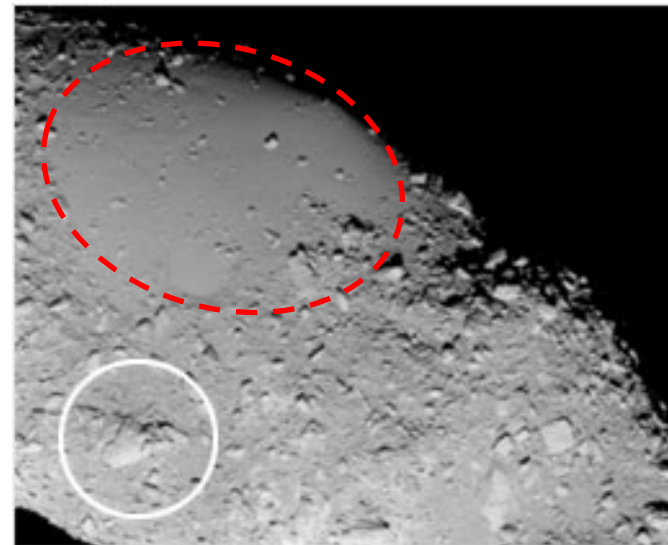
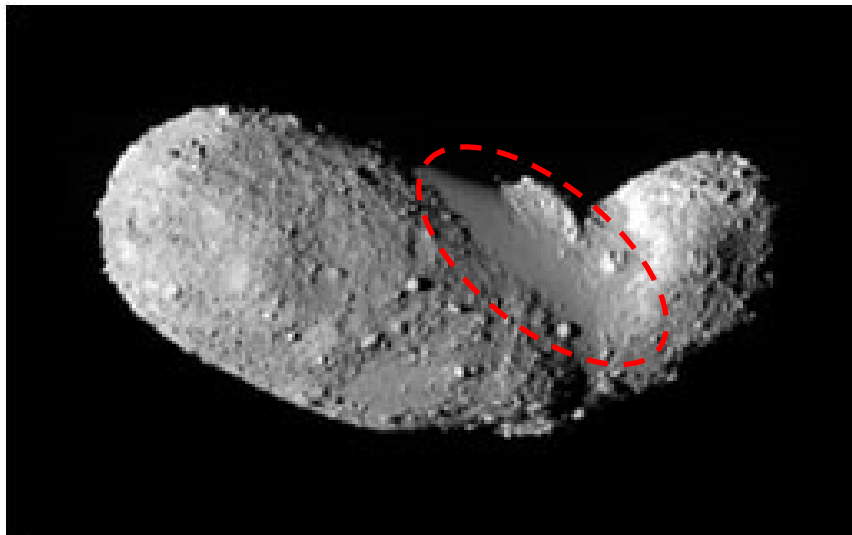




## 初号機の経験からの思い込み

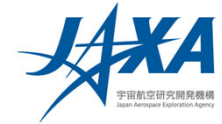


Ryuguにもイトカワの表面のように、すべすべの広域な領域(100m四方)が1つや2つは存在すると信じてタッチダウン計画を立てていた。

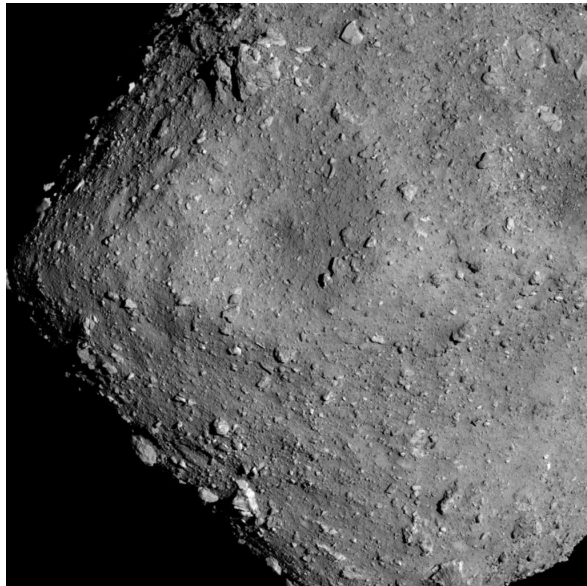




# 小惑星 Ryugu の表面

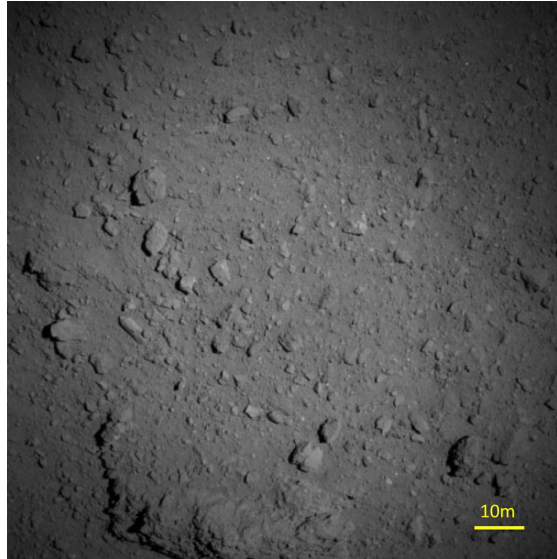


岩だらけ・・・



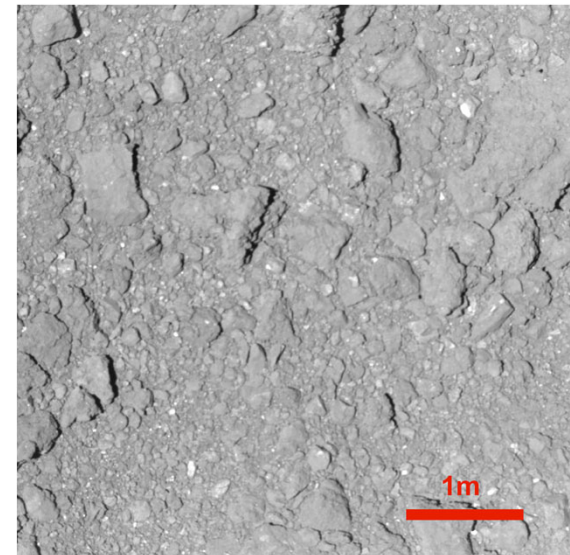
高度6kmより

2018年7月20日



高度1kmより

2018年8月7日

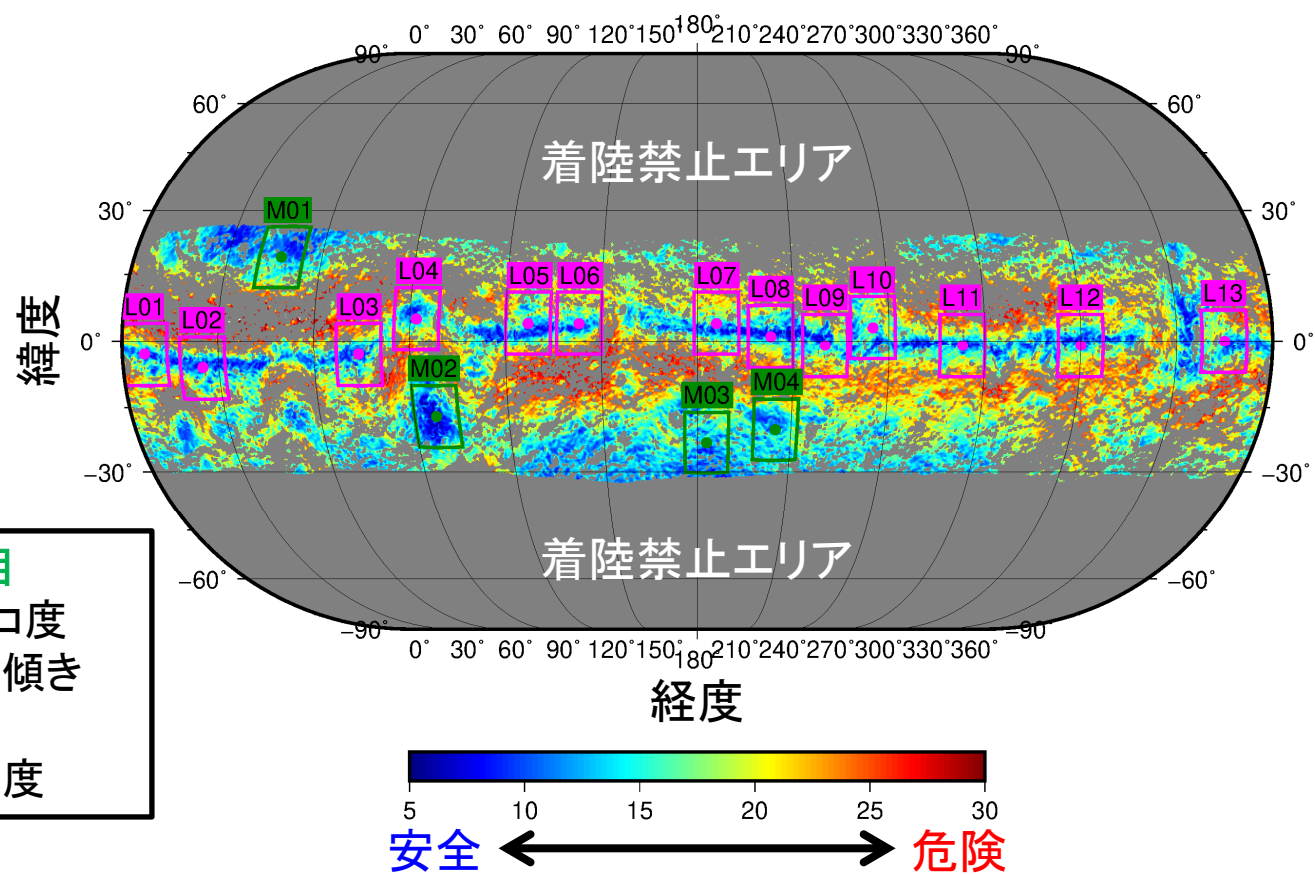


高度42mより

2018年10月15日

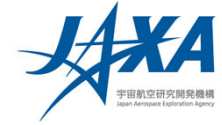


# 安全マップと着陸候補点



## 評価項目

- デコボコ度
- 地面の傾き
- 日射量
- 表面温度

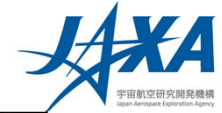


# 小惑星Ryugu到着後 :小惑星近傍フェーズ タッチダウン制御戦略





## はやぶさ2 小惑星近傍フェーズでの運用計画



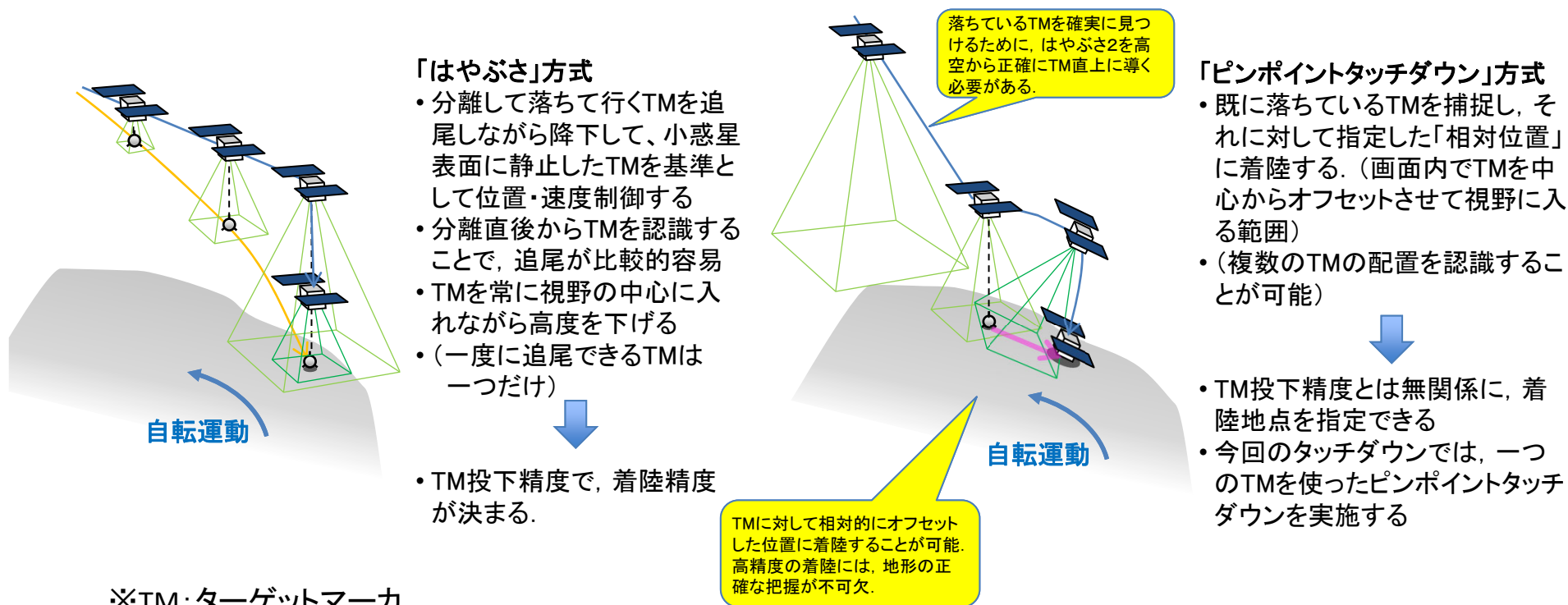
2021/05/29

派生開発カンファレンス2021

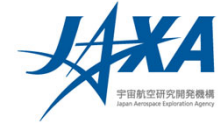


# タッチダウン運用計画

## はやぶさ2のピンポイントタッチダウン戦略

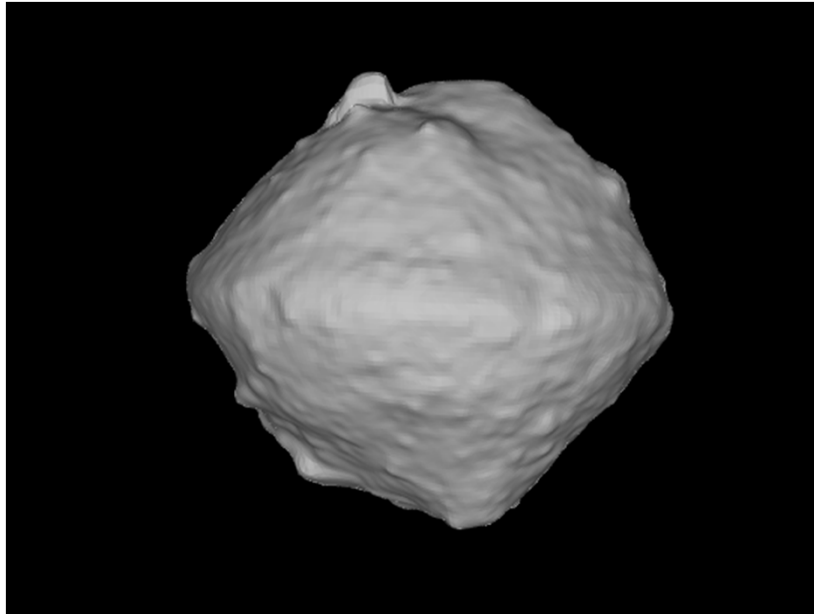


※TM: ターゲットマーカ

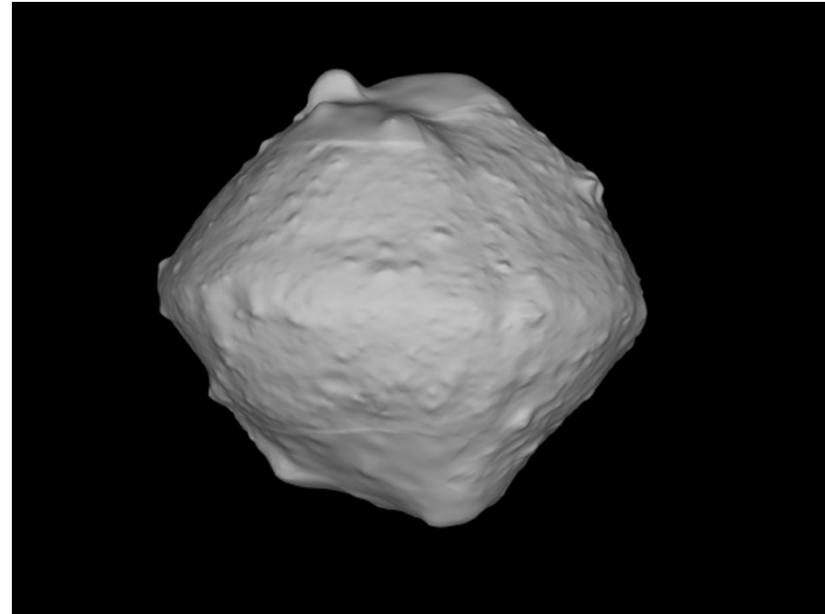


## リュウグウの3次元形状モデル

別々の手法で形状モデルを作成したが、両者はよく一致している



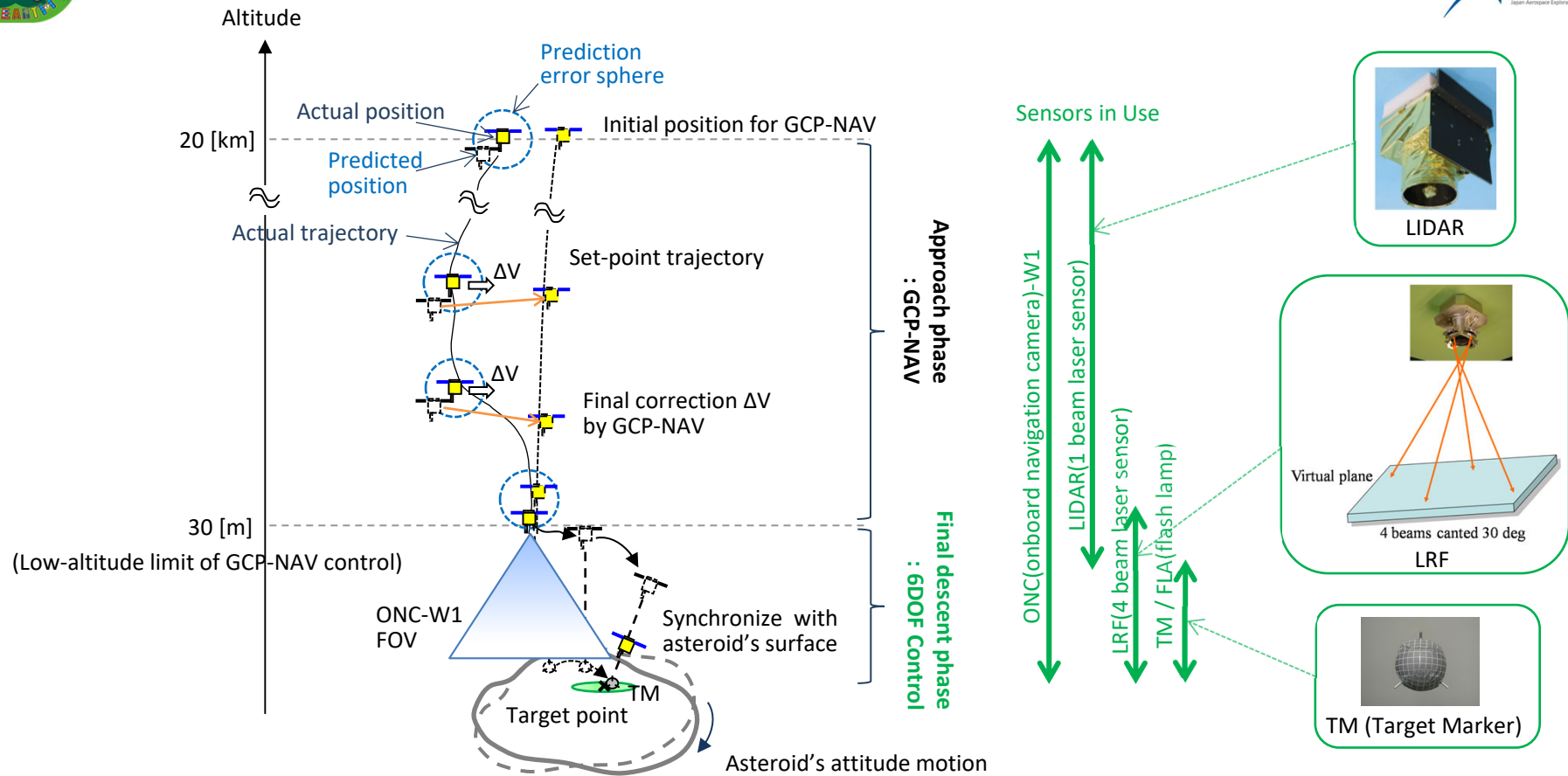
会津大による形状モデル  
(SfM)



神戸大による形状モデル  
(SPC)



# GCP-NAV(Global Control Point NAVigation) → 自律6自由度制御



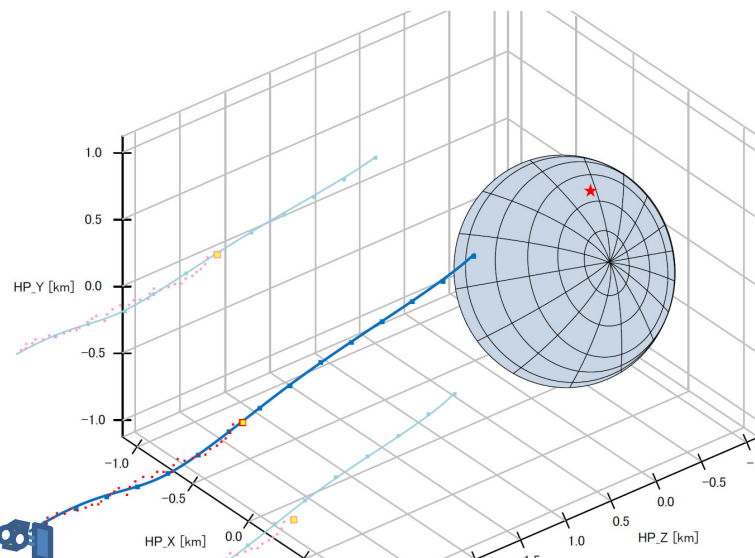
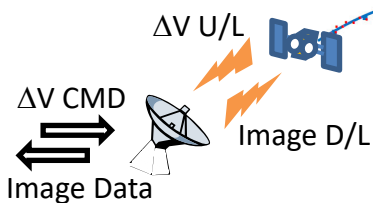
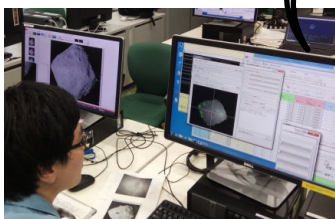
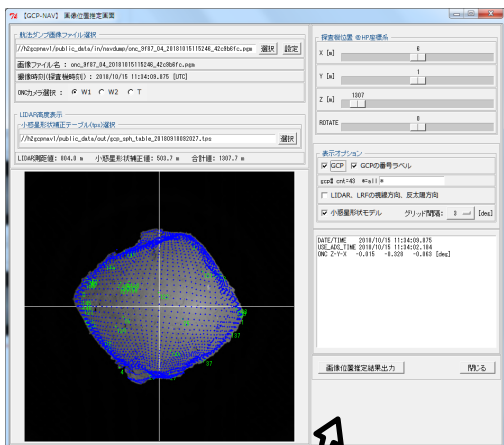


# Trajectory Control by GCP-NAV



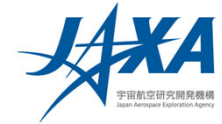
- Spacecraft descend to the target point by using GCP-NAV(Global Control Point-NAVigation) control scheme which is ground in the loop control with very large delay
- In this control scheme, the spacecraft position is determined by GCP matching

Shape & GCP Matching

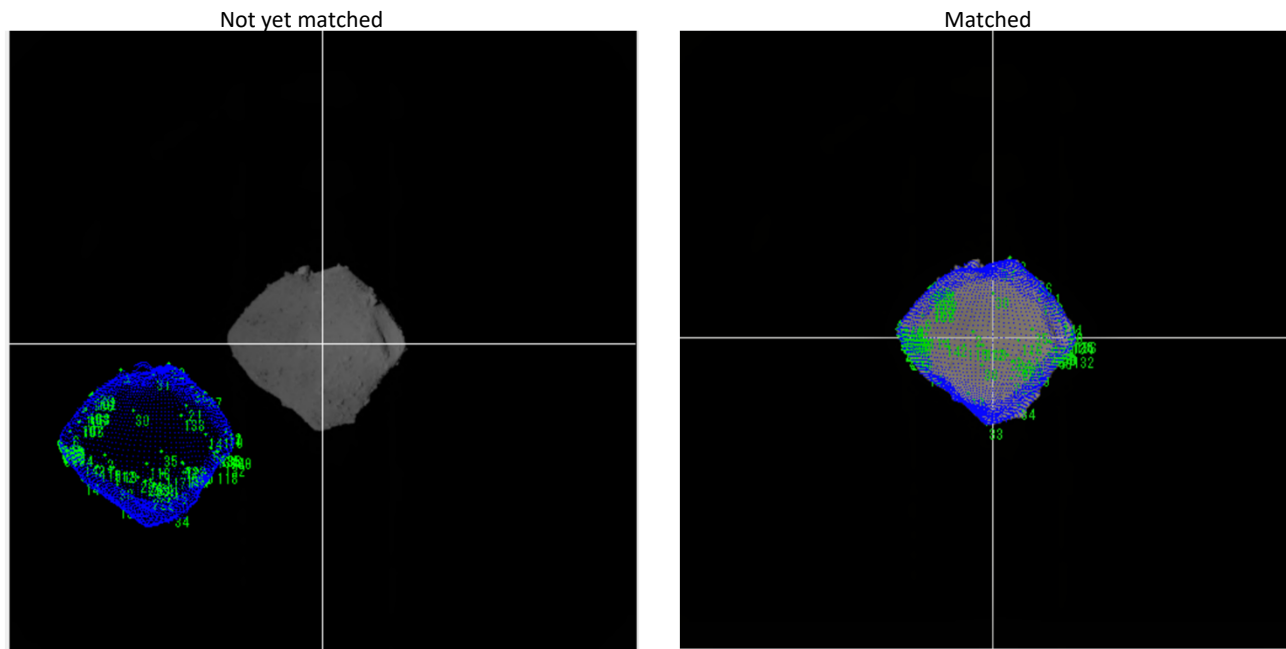




## Rim-Matching



- Point clouds of the asteroid shape model are indicated by blue dots, and GCPs are by green dots, which are superimposed on the asteroid image by using the craft attitude data, the ephemeris and the asteroid models.

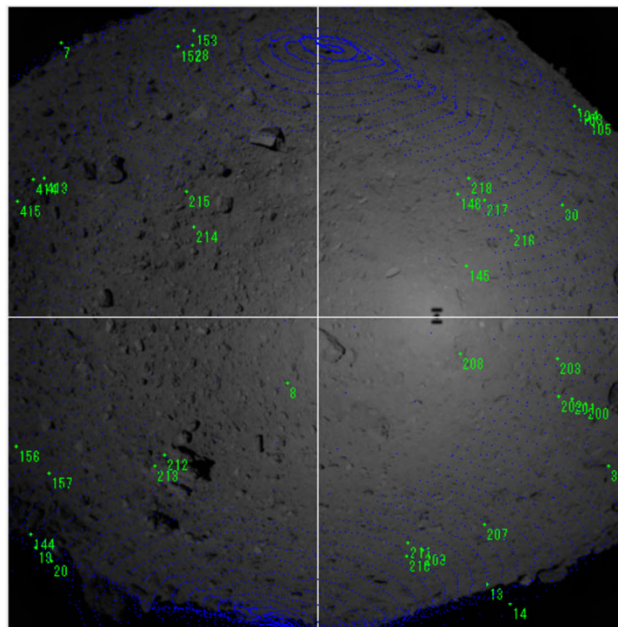




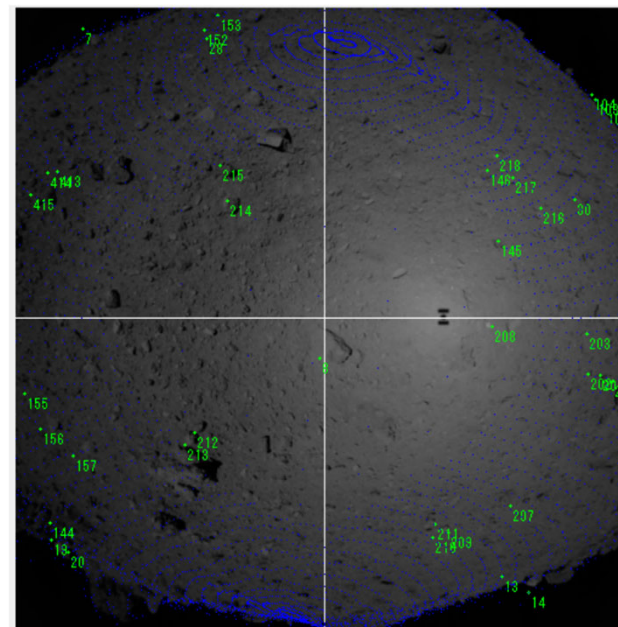
# GCP-Matching



Not yet matched

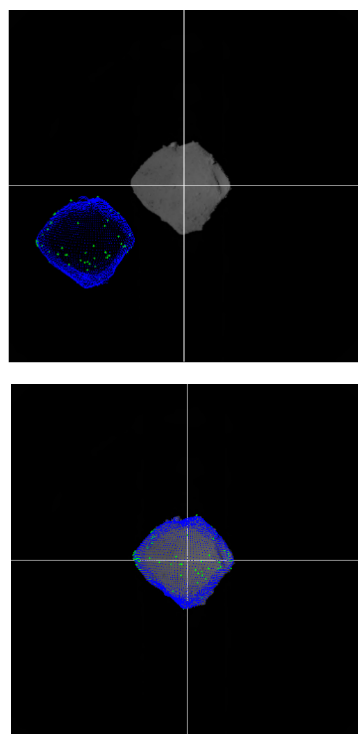


Matched

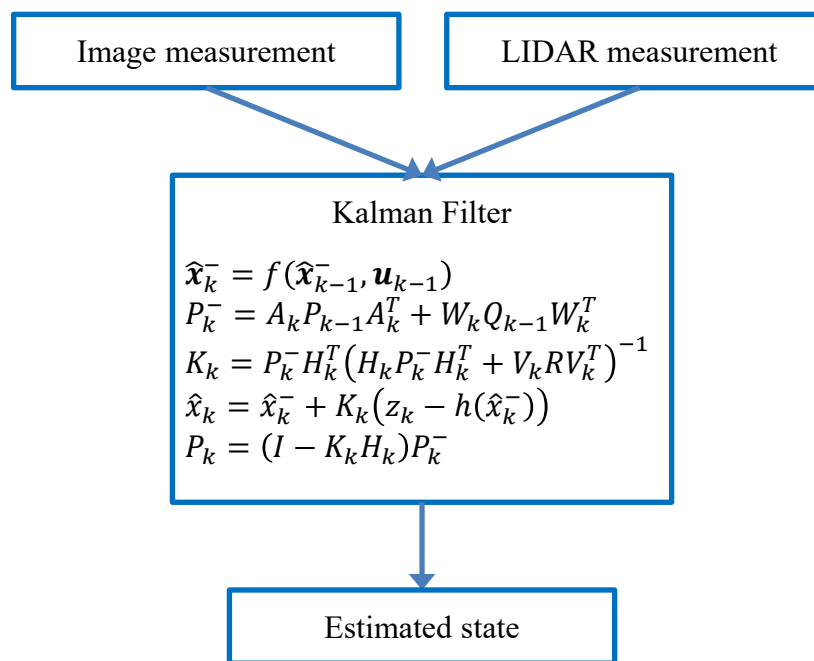




# Navigation



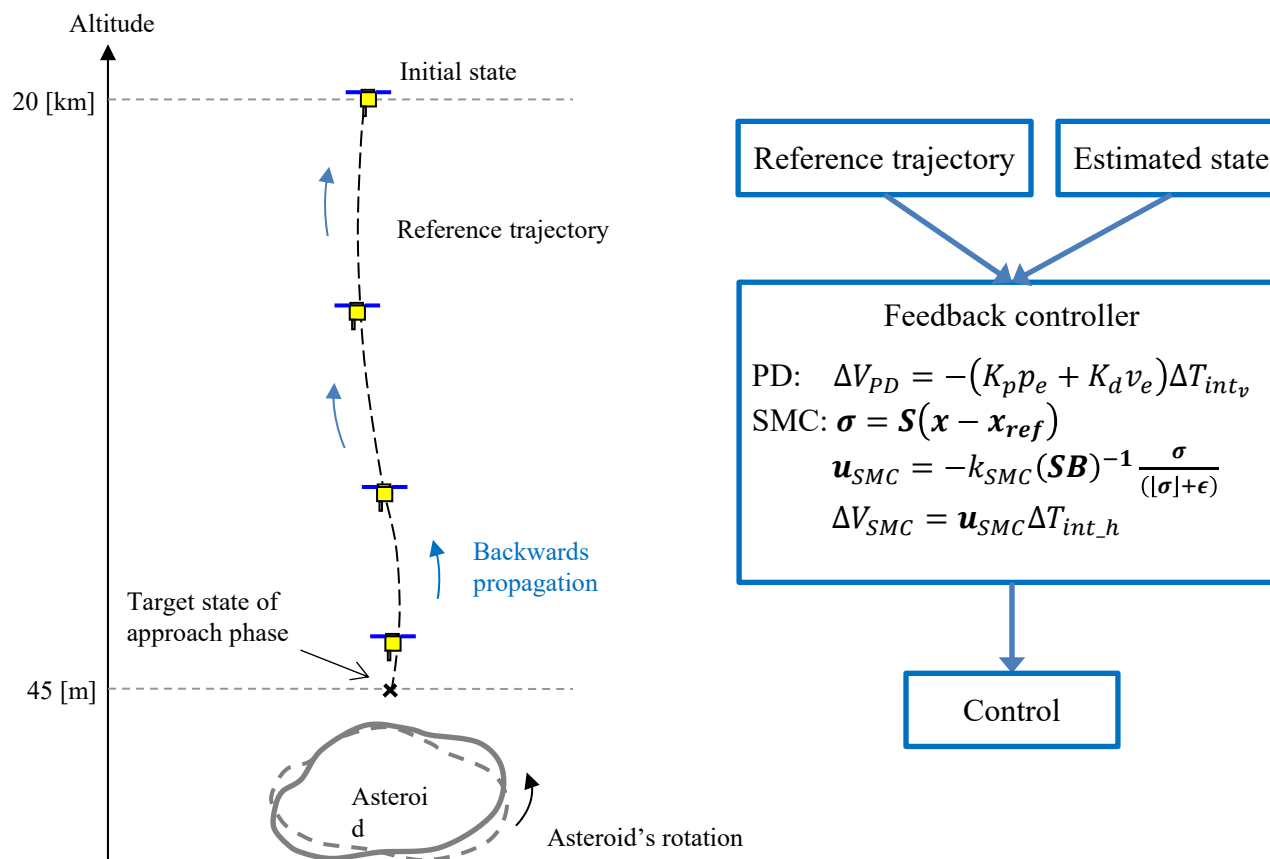
Shape & GCP matching





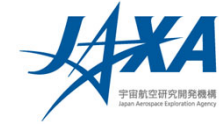


# Guidance & Control

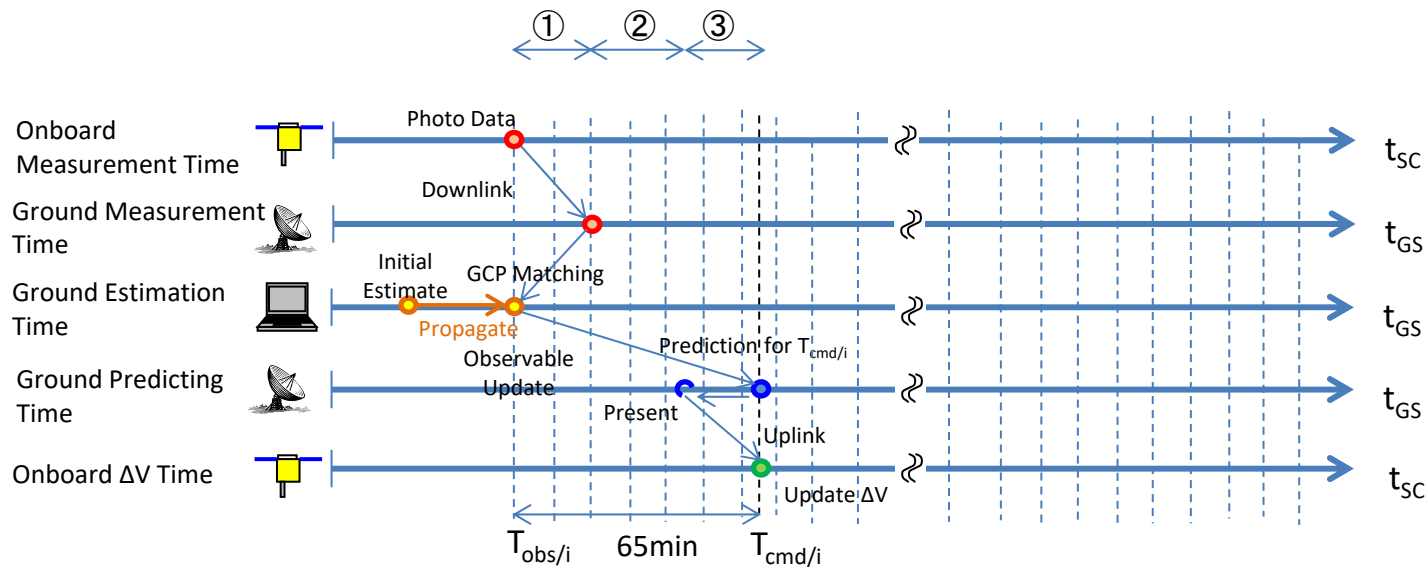




# GCP-NAV : 撮像 → 画像計測 → コマンド送信 → コマンド実施のタイミング



- ① One-way Data Transfer Hayabusa2 → Earth : 20min
- ② GCP matching, Prediction, and  $\Delta V$  Calculation : 25min
- ③ One-way Data Transfer Earth → Hayabusa2 : 20min

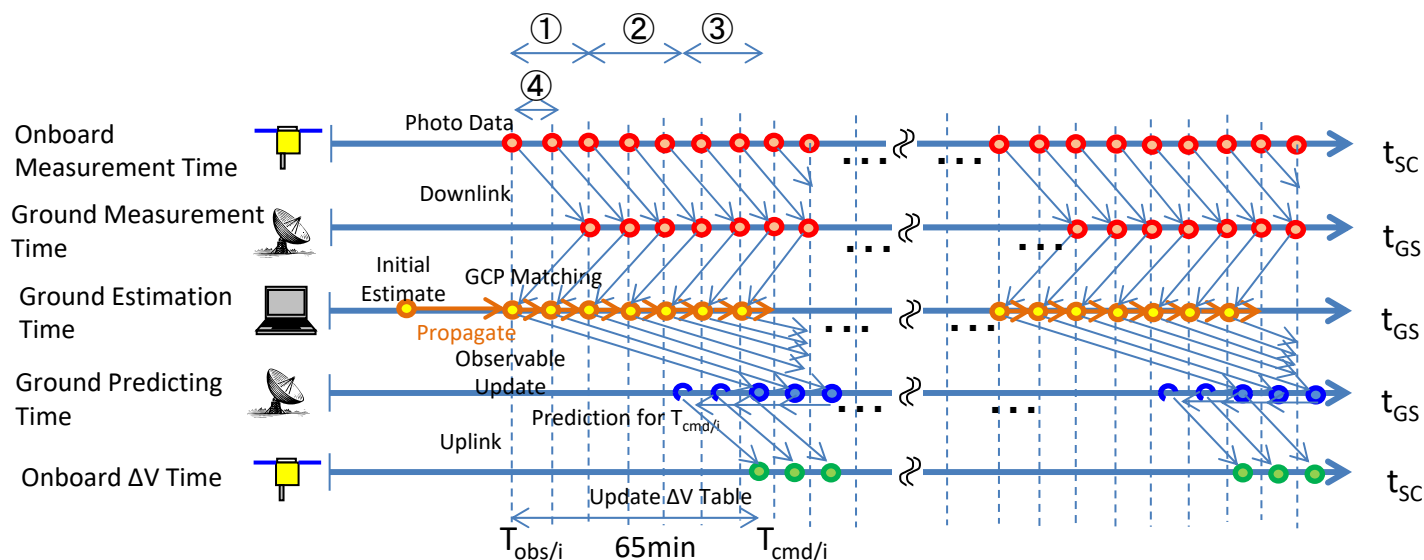




# GCP-NAV : 撮像 → 画像計測 → コマンド送信 → コマンド実施のタイミング

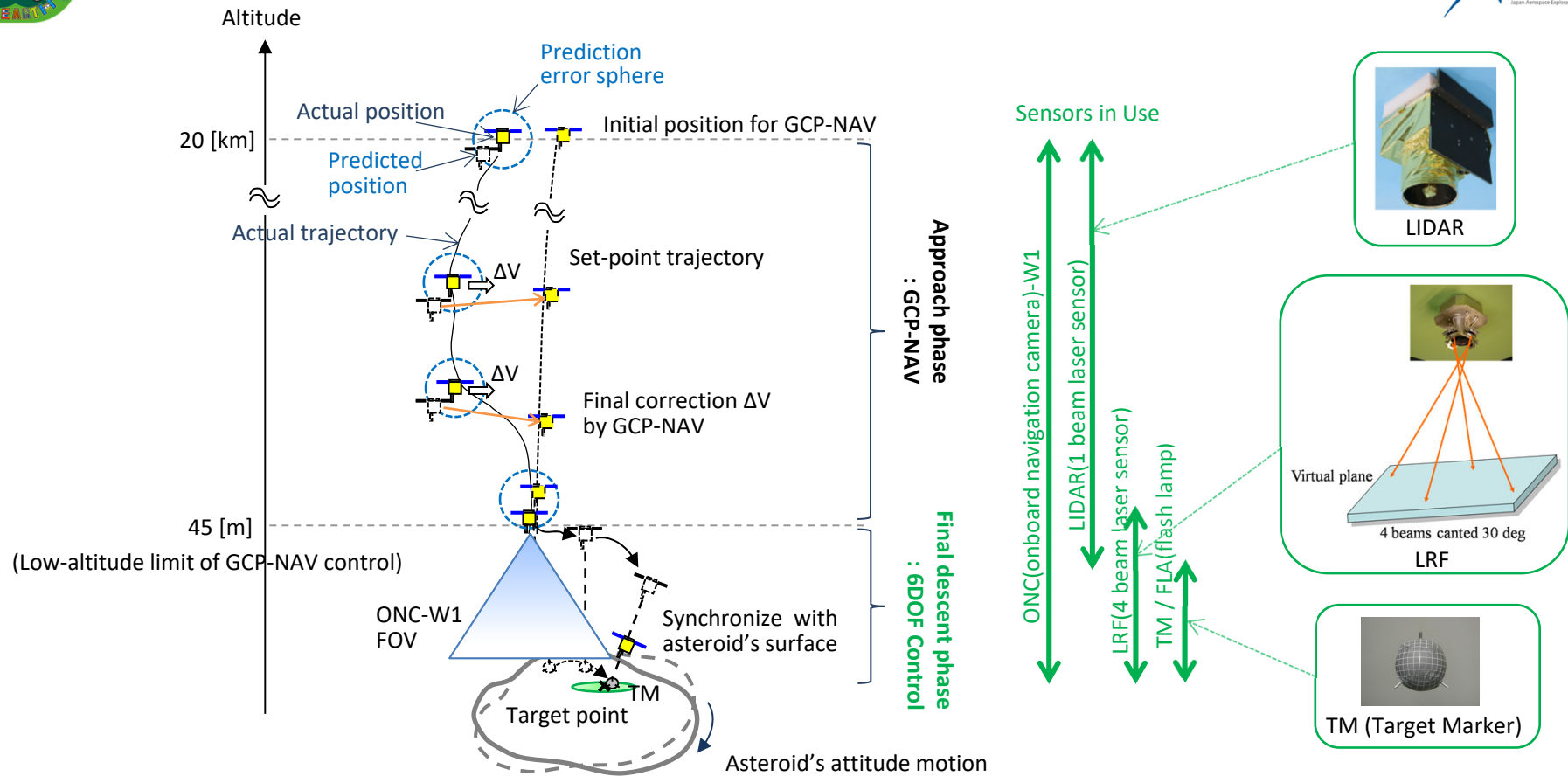


- ① One-way Data Transfer Hayabusa2 → Earth : 20min
- ② GCP matching, Prediction, and  $\Delta V$  Calculation : 25min
- ③ One-way Data Transfer Earth → Hayabusa2 : 20min
- ④ Image Capture Interval : 10min





# GCP-NAV(Global Control Point NAVigation) → 自律6自由度制御

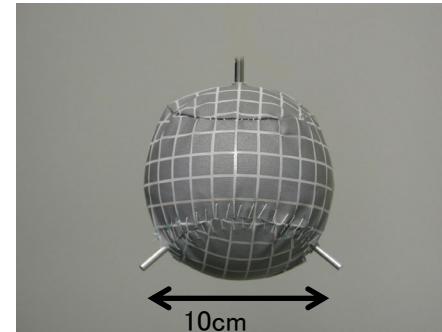




## ターゲットマーカ

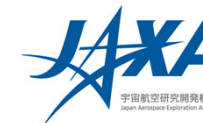


- タッチダウン(着陸)の前に人工的な目印として小惑星表面に降ろしておく。探査機がフラッシュをたき、カメラでターゲットマーカを認識しながら降下する。
- 上空から落としても、小惑星表面で弾まないように、“お手玉”の構造になっている。つまり堅いの容器の中に小さい粒が多数はいっている構造となっている。
- 表面の素材は、光をよく反射する素材になっている。
- 「はやぶさ2」では5個搭載。(「はやぶさ」では3個だった)
- 内部に名前を刻んだ薄いシートが入っている。



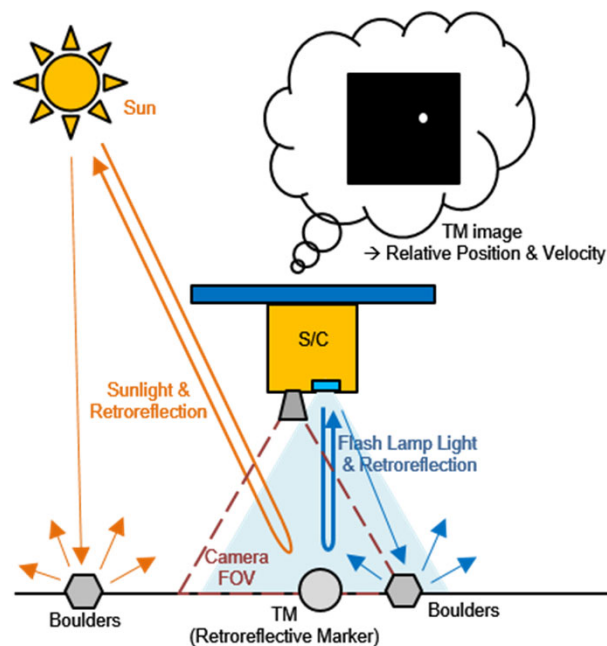


# Target Marker Tracking (TMT)



Key points:

1. Retroreflective and deployable artificial landmarks (TMs)
2. A flash lamp installed near the on-board camera
3. A robust image-processing algorithm to track a TM stably on the unknown natural terrain under unknown illumination conditions





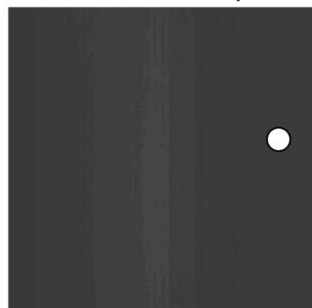
## Two Sub-Modes of TMT: DBT and NBT



Preprocessing before recognition to enhance robustness – two methods (we used both)

DBT (Differential Bright object Tracking): nominal

MAIN: Flash lamp ON



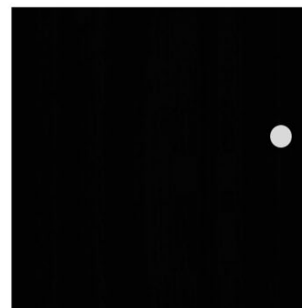
SUB: Flash lamp OFF



-

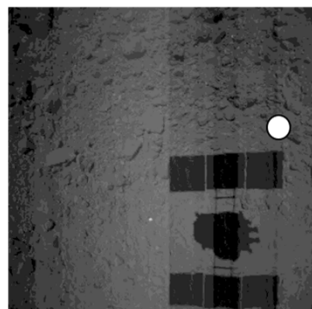
=

DIFF

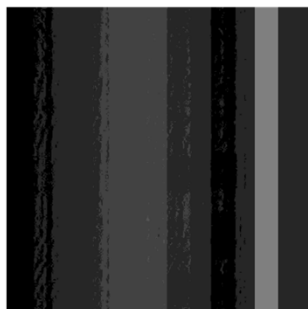


NBT (Normal Bright object Tracking): backup in case of small sun angle

MAIN: Long exposure, no flash lamp



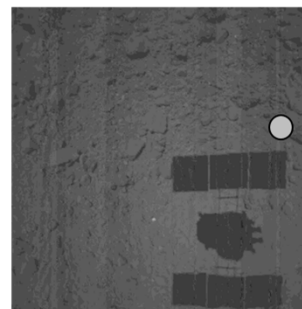
SUB: zero exposure



-

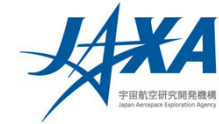
=

DIFF

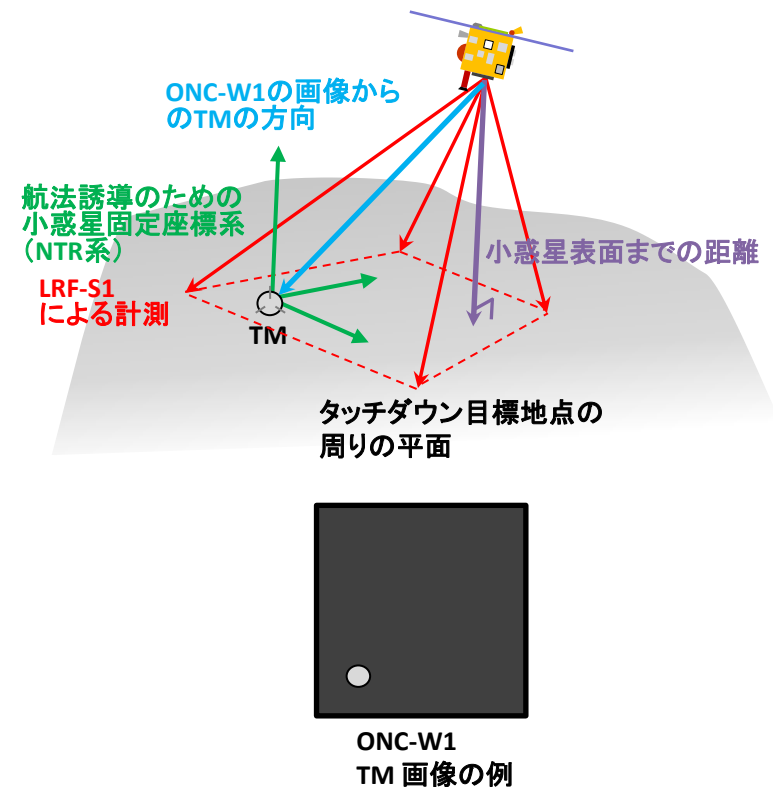




# 自律6自由度 誘導・航法・制御 : 小惑星相対 誘導・航法・制御



- 目標地点の周りの平面に垂直な、TMを原点とした小惑星固定座標系(NTR系)を、ある瞬間のLRF測距値を用いて定義
- 以下の情報を用いて小惑星固定座標系(NTR系)基準の位置・速度を搭載S/Wが推定
  - ✓ ONC-W1画像内のTMの位置
  - ✓ 小惑星表面までの距離 (LRF 測距値から計算)
- 位置制御目標値は小惑星固定座標系(NTR系)基準座標値として事前に搭載S/Wに設定
- 姿勢は慣性系基準でジャイロ計測値を用いて推定(STTは使用しない)
- 小惑星表面に倣うための姿勢制御目標値を小惑星固定座標系(NTR系)基準クオターニオンとして事前に搭載S/Wに設定
- スラスタを用いて6自由度制御  
(デッドバンドを含むSliding Mode Control)







# Sliding-mode-control for 6DOF control



## Definition of switching curve

$$\begin{cases} \sigma_0(\mathbf{x}) = kx_1 + x_2 = 0 \\ \sigma_1(\mathbf{x}) = kx_1 + x_2 - kp_r = 0, & \sigma_2(\mathbf{x}) = kx_1 + x_2 + kp_r = 0 \\ \sigma_3(\mathbf{x}) = x_2 - v_r = 0, & \sigma_4(\mathbf{x}) = x_2 + v_r = 0 \\ \sigma_5(\mathbf{x}) = x_2 - v_{\min} = 0, & \sigma_6(\mathbf{x}) = x_2 + v_{\min} = 0 \\ \sigma_7(\mathbf{x}) = x_2 - v_{\text{limit}} = 0, & \sigma_8(\mathbf{x}) = x_2 + v_{\text{limit}} = 0 \\ \sigma_{10}(\mathbf{x}) = x_2 - v_{\text{mid}} = 0, & \sigma_{20}(\mathbf{x}) = x_2 + v_{\text{mid}} = 0 \\ \sigma_{30}(\mathbf{x}) = x_2 - v_{\max} = 0, & \sigma_{40}(\mathbf{x}) = x_2 + v_{\max} = 0 \end{cases}$$

## Definition of control input

For coarse control area

$$u = -K_{\text{coarse}} \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (C_1 \sim C_6)$$

$$u = K_{\text{coarse}} \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (C_7 \sim C_{12})$$

$$u = -F_{\min} \quad (D_4 \sim D_6)$$

$$u = F_{\min} \quad (D_7 \sim D_9)$$

For fine control area

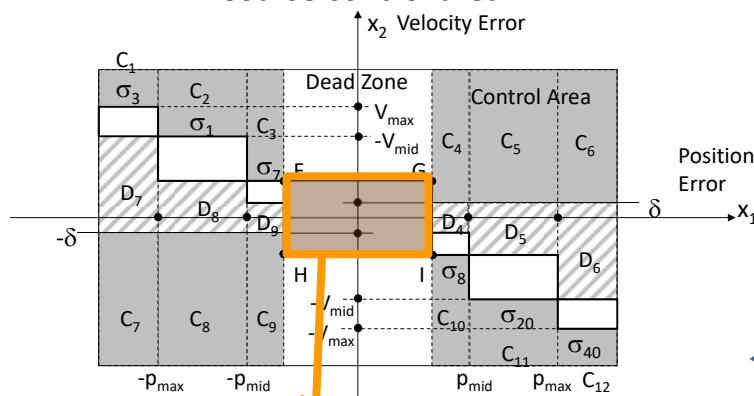
$$u_i = -M(kx_2 + \gamma \sqrt{|\sigma_i|} \text{sign}(\sigma_i)) \quad (i = 0, 1, 2)$$

$$u_j = -M\gamma \sqrt{|\sigma_i|} \text{sign}(\sigma_i) \quad (i = 3, 4, \dots, 8)$$

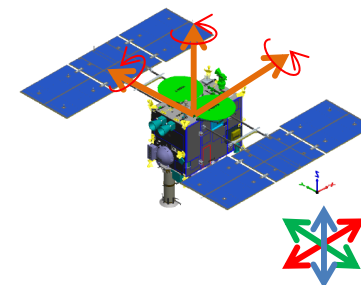
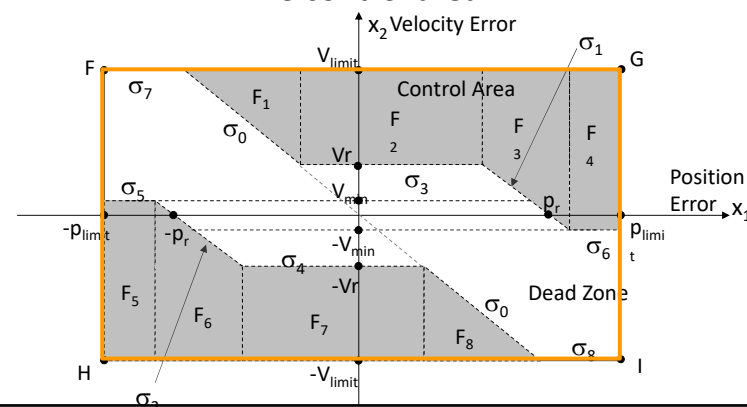
For other area

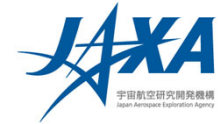
$$u = 0$$

## Coarse control area



## Fine control area



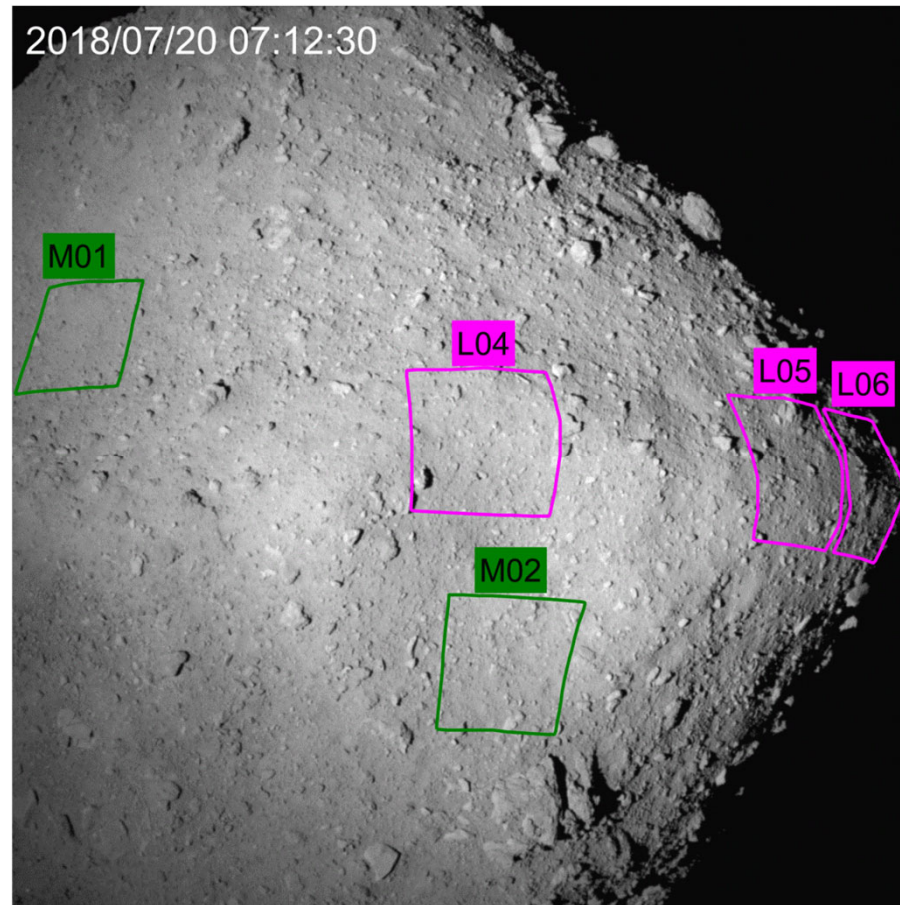
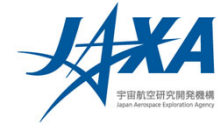


# 小惑星近傍フェーズ

## : 2019/02/22 第1回タッチダウン 着陸地選定

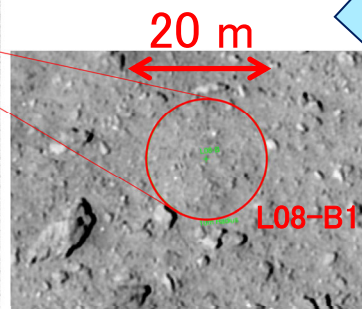
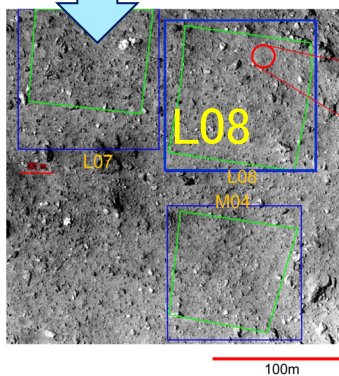
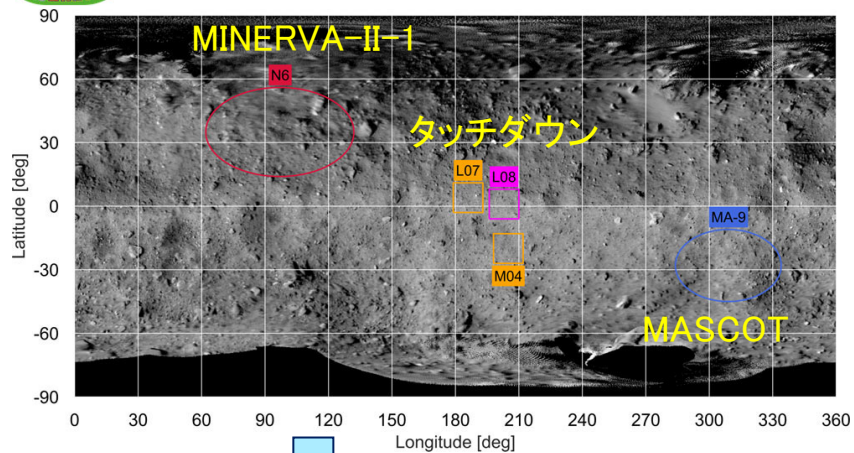


# TD候補地点

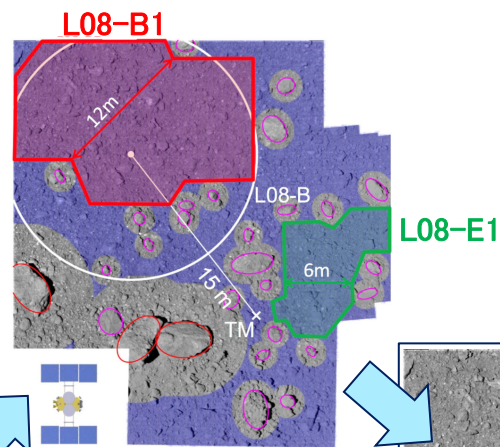




# TD1 着地点選定

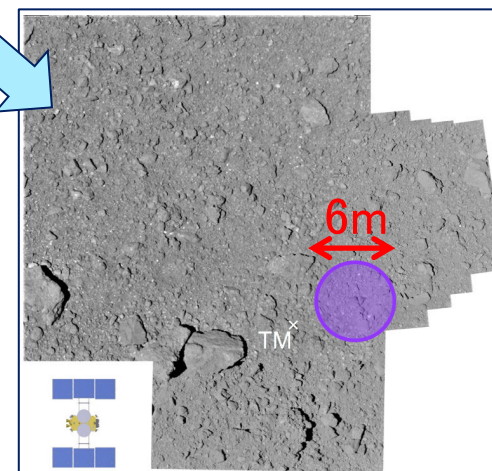


L08-B1がタッチダウン候補地点に選定



最終的にL08-E1が選定

TM: ターゲットマーカ





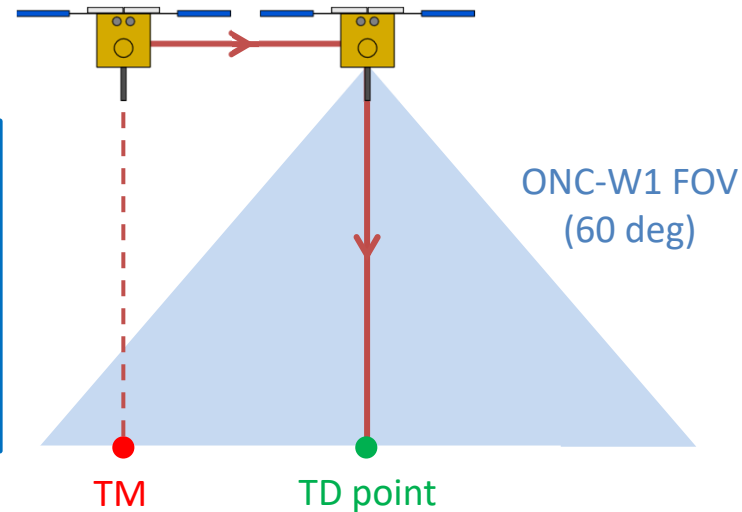
# Touchdown Operation Plan

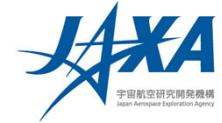


## Dropped TM-based Guidance

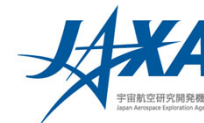
- ❑ Using TM in the FOV of ONC-W1 the spacecraft can navigate and control its position with high accuracy. (e.g. 0.3[m], 1[mm/s])
- ❑ If TM is in FOV of ONC-W1, the spacecraft can move to the position just above the TD point.
- ❑ After that, just free fall but with velocity control error ... TD position error.

Altitude from the TM is larger  
→ TD start (free fall start) altitude is higher  
→ possible to move laterally more  
but  
loss of TD precision  
→ trade off !



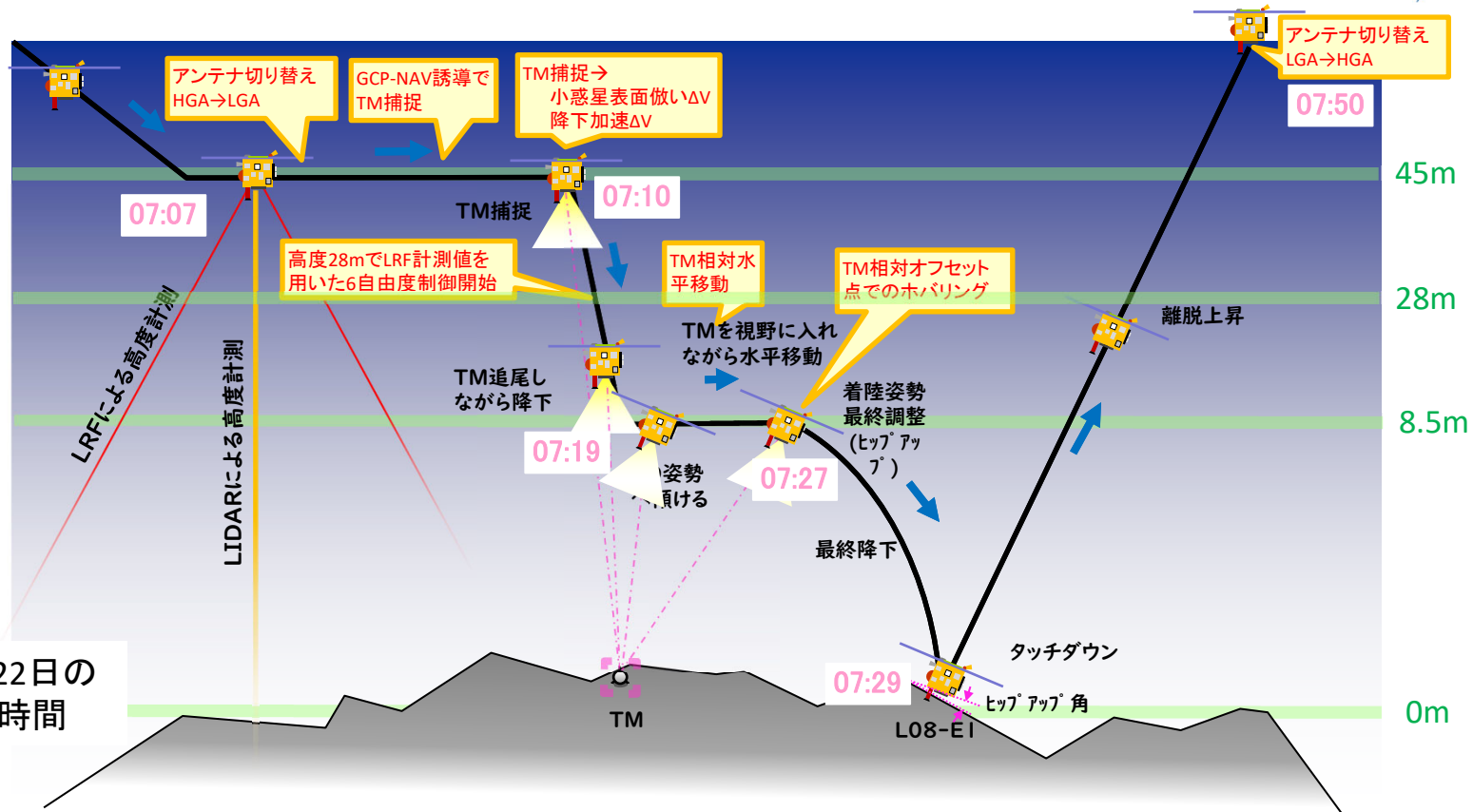


# 小惑星近傍フェーズ :2019/02/22 第1回タッチダウン 運用計画



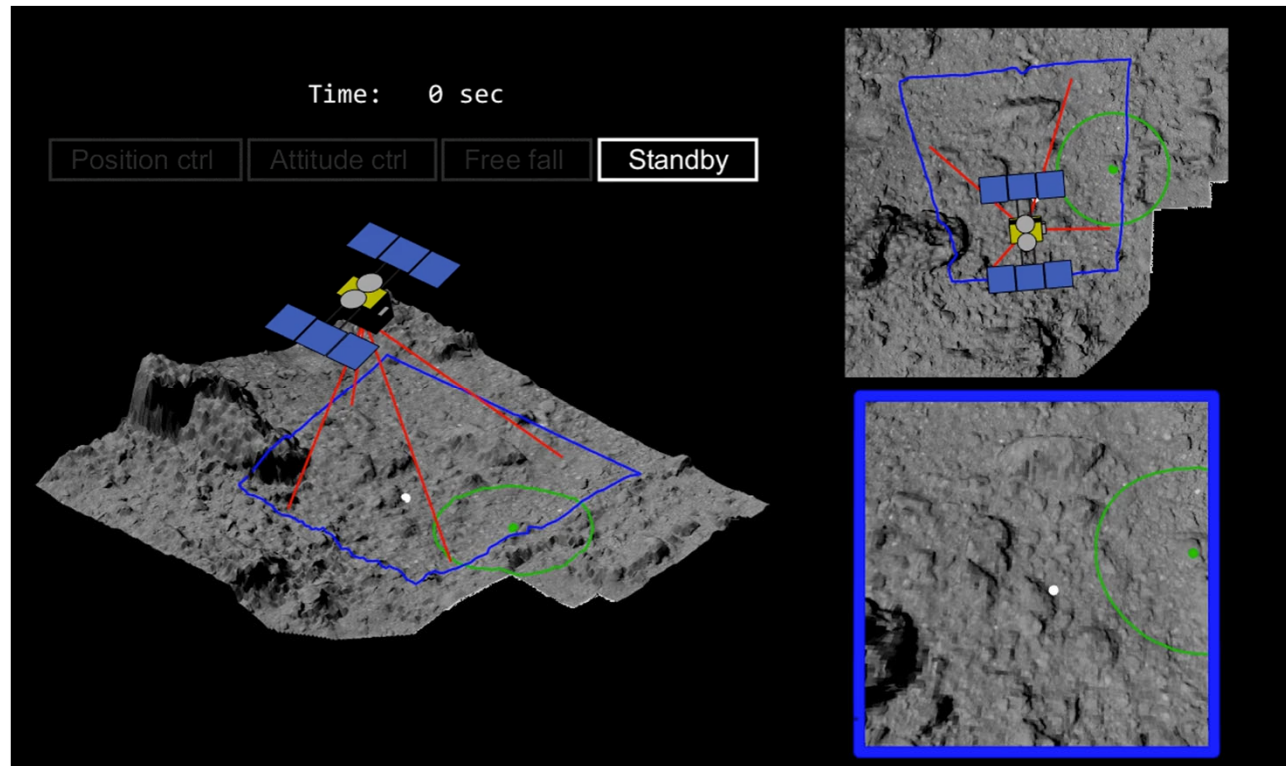
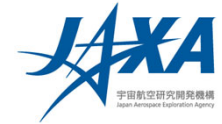
# 第1回タッチダウン運用シーケンス

低高度





# 第1回タッチダウン シミュレーション





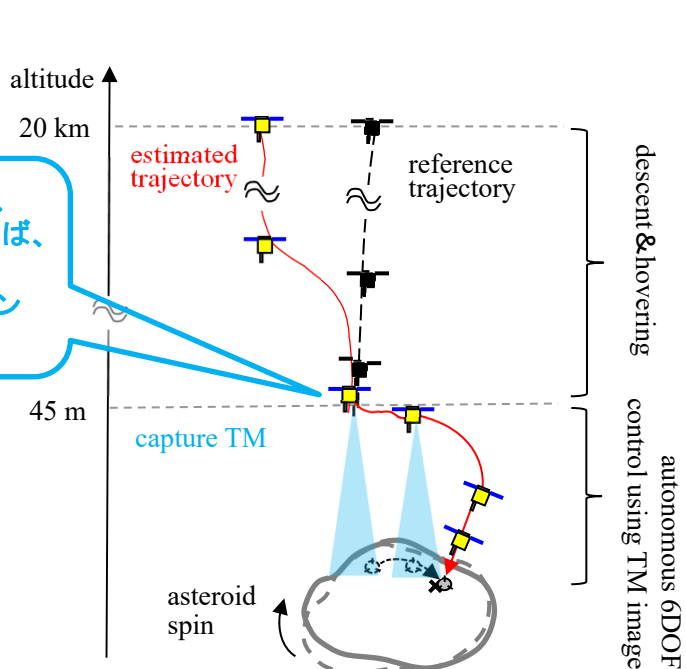


# 高精度ピンポイントタッチダウンにおける航法誘導制御の課題と対策



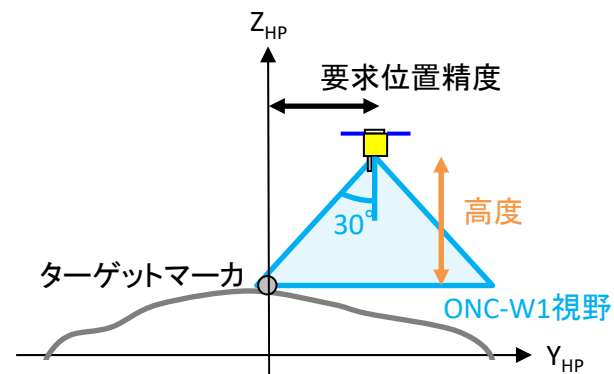
## ① GCP-NAV誘導制御精度 (ターゲットマーカを自動で画像認識)

上空で待ち構えていて、  
TMを見つけられなければ、  
緊急上昇！  
見つけたら、タッチダウン  
降下開始。



高度が高い → 見える範囲が広いのでTMを見逃さない  
高度が低い → TMが大きく明るく見えるのでTMを見つけやすい

↓  
ベストな高度を設定





# 高精度ピンポイントタッチダウンにおける航法誘導制御の課題と対策



## ②小惑星表面凸凹に起因する計測誤差

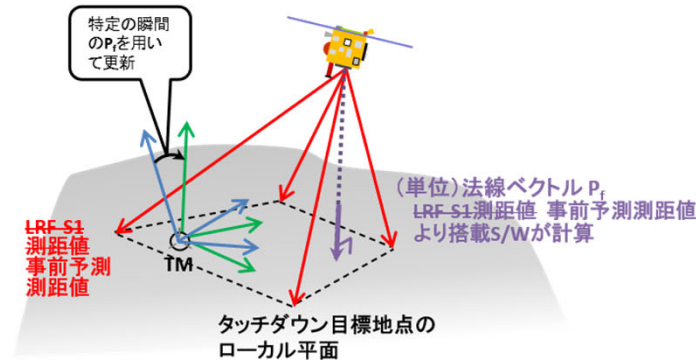
### 「騙しLRF測距値」による小惑星固定座標系(NTR系)の定義

**NT(Normal Tangential)系**

- GCP-NAV降下終了後に定義される小惑星固定座標系
- Z軸: 降下中の地球方向
- Y軸: ほぼ小惑星のスピンの方向
- X軸: XZ平面が小惑星のスピンの軸を含む
- 原点: 特に規定なし

**NTR(Normal Tangential Radial)系**

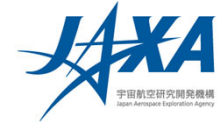
- $P_f$ が計算される特定の瞬間にNT系を更新することで定義される小惑星固定座標系
- TDの際の6自由度航法・制御の基準座標系
- 定義の際にNT系定義時刻誤差、探査機の姿勢誤差に影響を受ける
- Z軸:  $P_f$ と平行
- 原点: TM



- 全ては搭載S/Wによる自動計測、自動制御
- 小惑星表面凸凹でLRFの測距値に誤差が生じる可能性が高いことが予想された
- 小惑星形状、表面凸凹が事前の計測である程度わかっているなら、「この場所だったらLRFの測距値はこれくらい」と予測できる値の方が誤差が小さい
- LRF計測値を使わないで探査機内部の搭載S/Wに予測値を教えて(「騙して」)、その値を用いて小惑星固定座標系を定義する
- LRFの測距値では高度だけを測る。
- 小惑星表面との傾きは探査機内部の姿勢角速度計の情報から計算する



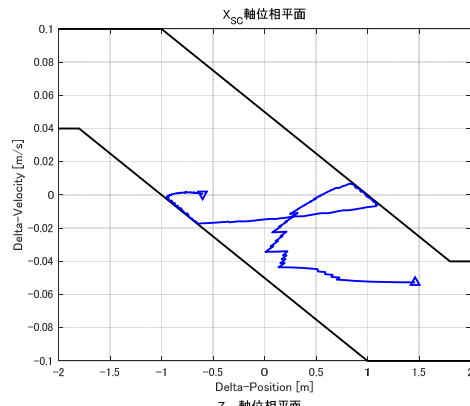
# 高精度ピンポイントタッチダウンにおける航法誘導制御の課題と対策



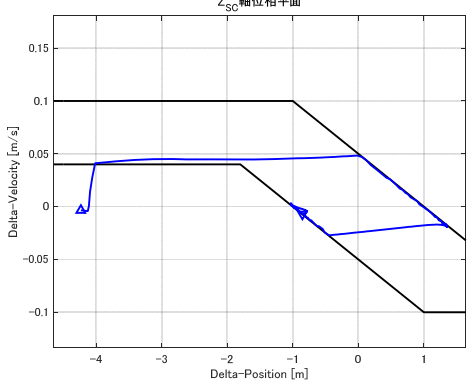
## ③ 狭いタッチダウンエリアへの対応

### a. 位置制御系 デッドバンド幅のチューニング シミュレーション評価

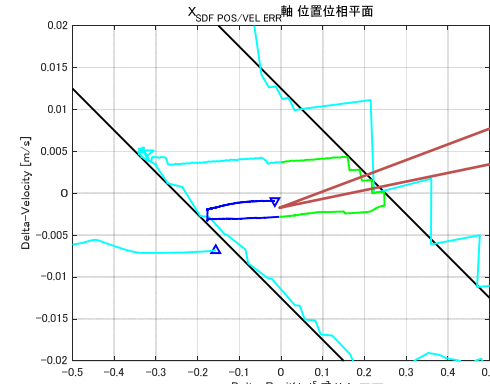
位置x軸



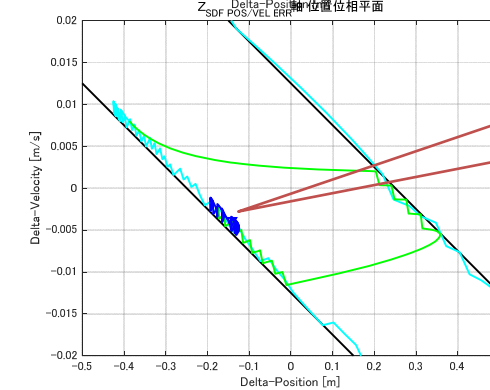
位置z軸



デッドバンド幅  
1.0[m] → 25[cm]



収束時間を十分に長くすることによって、航法系の収束を待つと共に、 $\Delta V$ による速度誤差の収束を図る



収束時間を十分に長くすることによって、航法系の収束を待つと共に、 $\Delta V$ による速度誤差の収束を図る

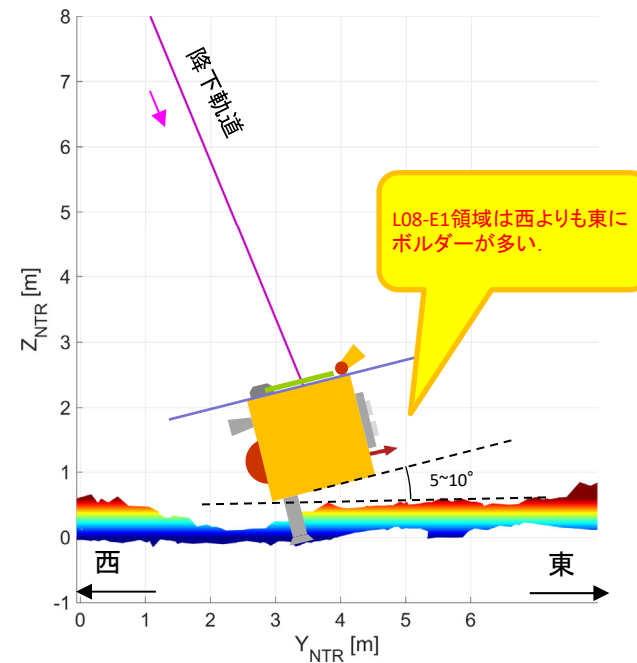


## 高精度ピンポイントタッチダウンにおける航法誘導制御の課題と対策



### ③狭いタッチダウンエリアへの対応

#### b. 着陸安全余裕拡大のための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

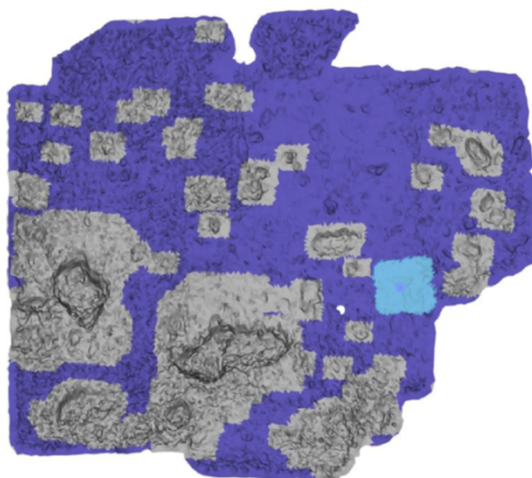


# 第1回タッチダウン 危険確率:着地点分布評価 モンテカルロシミュレーション



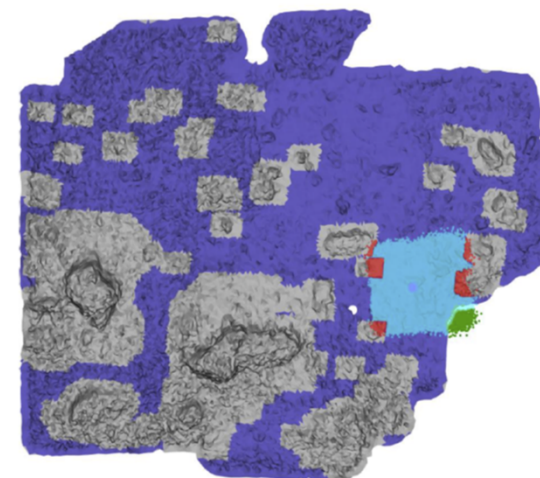
ノミナル

Risk probability: 0.00%



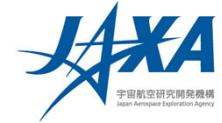
ワースト

Risk probability: 4.87%



以下の着陸点誤差要因を考慮

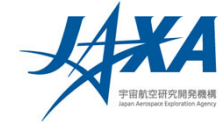
- ① 降下開始時の3自由度位置・速度誤差
- ② 降下開始時の3自由度姿勢誤差
- ③ 降下開始時の $\Delta V$ 誤差  
(RCS推力単体誤差)
- ④ 航法カメラレンズひずみに起因する位置  
推定誤差
- ⑤ 降下開始時の目標姿勢(設定)誤差  
(小惑星3次元形状モデル誤差に起因)
- ⑥ 降下開始時の姿勢を定義する座標系の  
誤差  
(小惑星固定座標系の定義誤差)



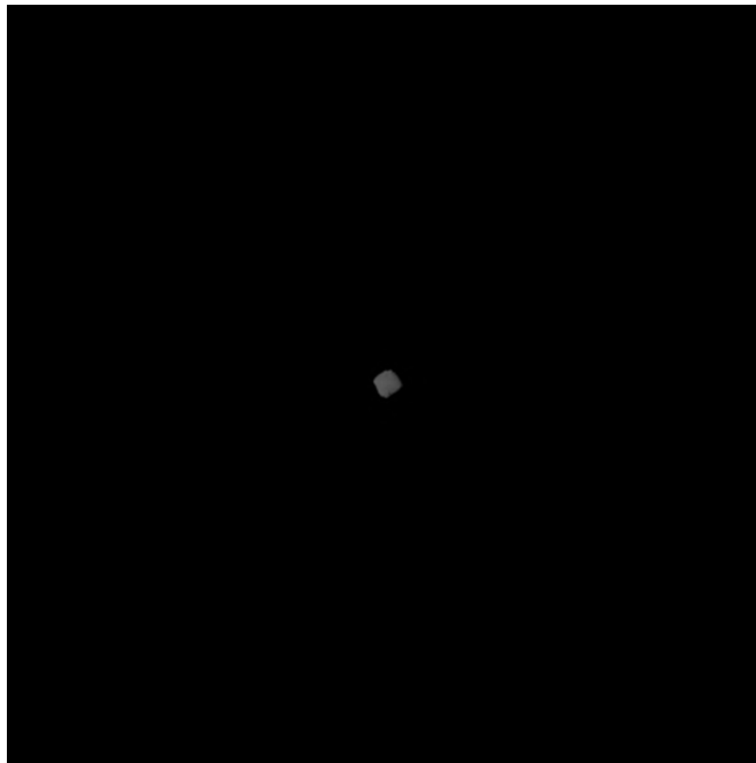
# 小惑星近傍フェーズ :2019/02/22 第1回タッチダウン 運用結果



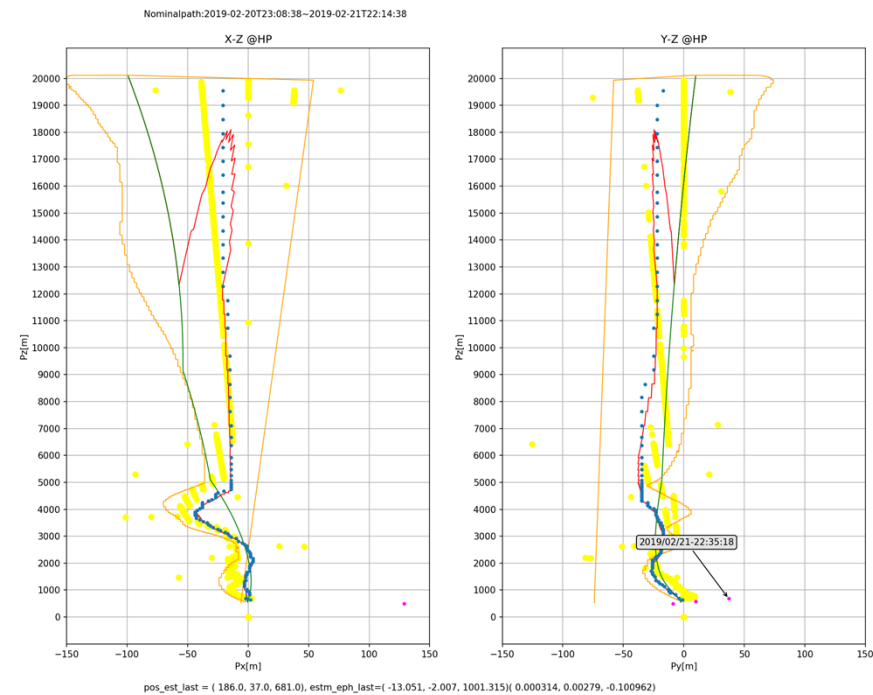
# 第1回タッチダウン GCP-NAV降下結果



GCP-NAV画像航法に用いた  
ONC-W1航法ダンプ画像

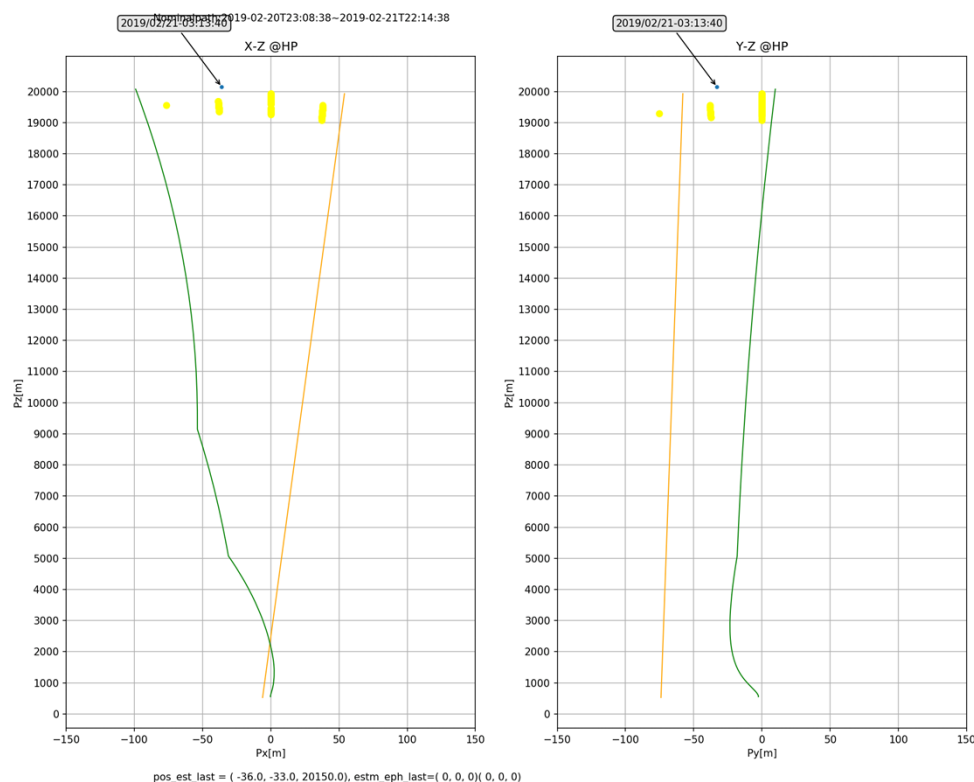


- 緑線: 規範パス
- 青点: (地上ツール)航法画像を用いた位置計測値
- 赤線: (地上ツール)カルマンフィルタ位置推定値  
( $\Delta V$ 計算に用いた予測値ではない)
- 黄点: (搭載S/W)AIT(Asteroid Image Tracking)計測値  
(航法画像内小惑星図心を用いた位置計測値)
- 橙線: (搭載S/W)カルマンフィルタ位置推定値





# 第1回タッチダウン GCP-NAV降下結果動画



- 緑線: 規範パス
- 青点: (地上ツール)航法画像を用いた位置計測値
- 青線: (地上ツール)時々刻々の、最新画像計測結果(青点)に基づいて $\Delta V$ を計算する際のカルマンフィルタ位置予測値
- シアン線: (地上ツール)航法画像を用いた位置計測値(青点)に基づいたカルマンフィルタ位置予測値  
(計測誤差を含まない位置計測値をフィードバックした $\Delta V$ を用いた予測値なので現実よりは制御結果が良い)
- 赤線: (地上ツール)カルマンフィルタ位置推定値  
( $\Delta V$ 計算に用いた予測値ではない)
- 黄点: (搭載S/W)AIT(Asteroid Image Tracking)計測値  
(航法画像内小惑星図心を用いた位置計測値)
- 橙線: (搭載S/W)カルマンフィルタ位置推定値



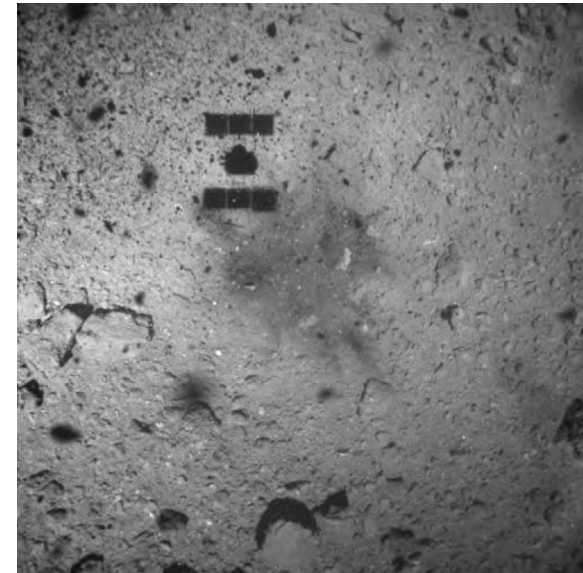


# 第1回タッチダウン運用結果



## まとめ

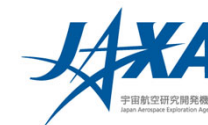
- タッチダウン運用  
2019年2月20日～22日
- タッチダウンの時刻  
2019年2月22日、07:29:10  
(時刻は日本時間、機上時刻)
- タッチダウン場所  
L08-E1内の半径3mの円内  
誘導制御の精度: 1m  
サンプル採取地点も特定
- 手法  
投下済みのTM-Bを使ったピンポイントタッチダウンの手法



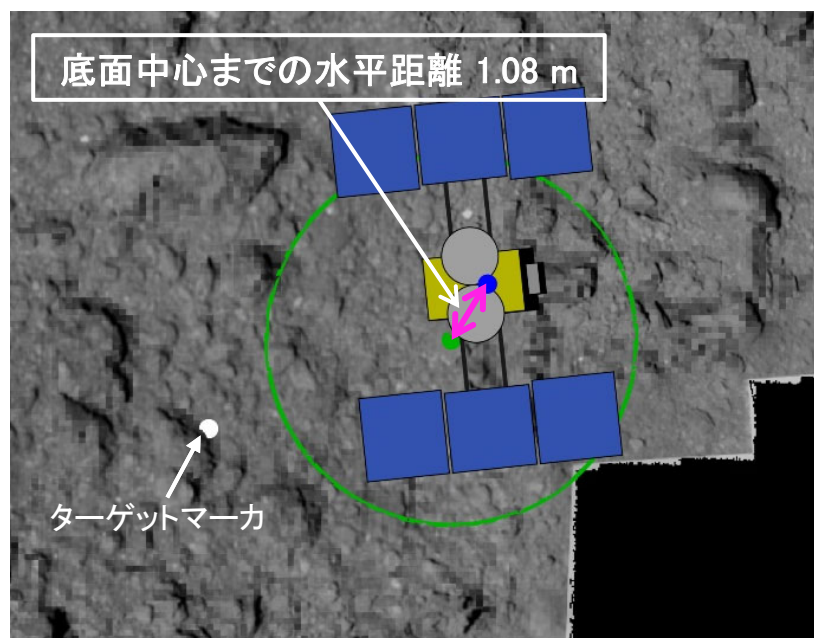
タッチダウン直後の2019年2月22日07:30頃(日本時間、機上時刻)にタッチダウン地点付近を撮影した画像。広角の光学航法カメラ(ONC-W1)で撮影。高度は約25m。



# 第1回タッチダウン精度とサンプルラホーン接地点

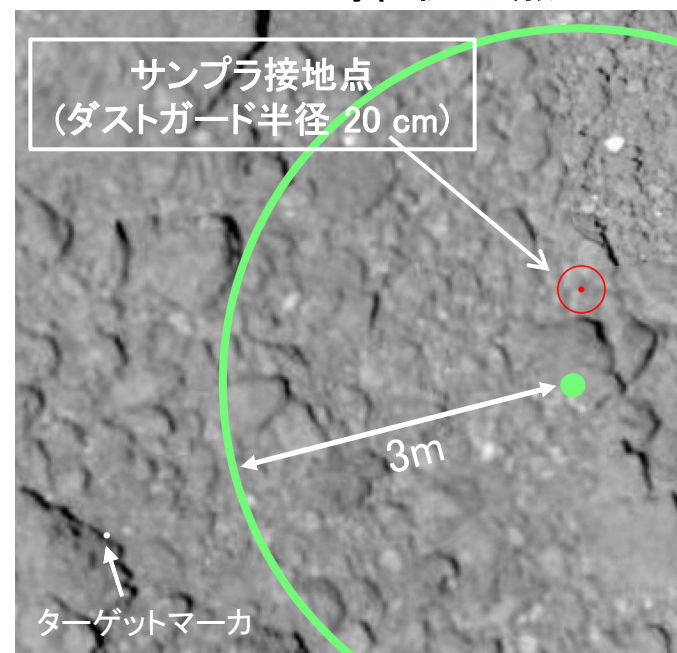


## タッチダウン地点



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、探査機を中心(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



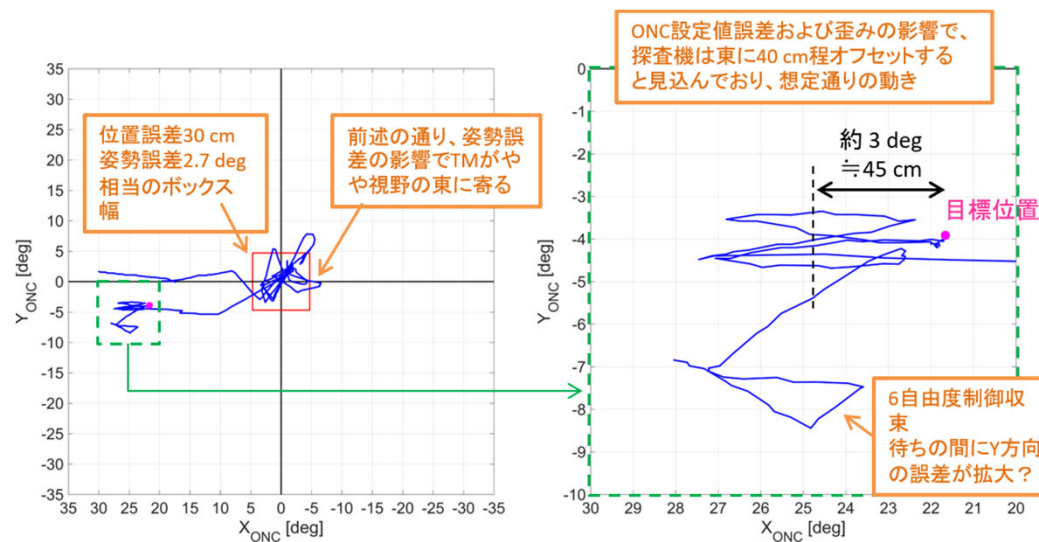
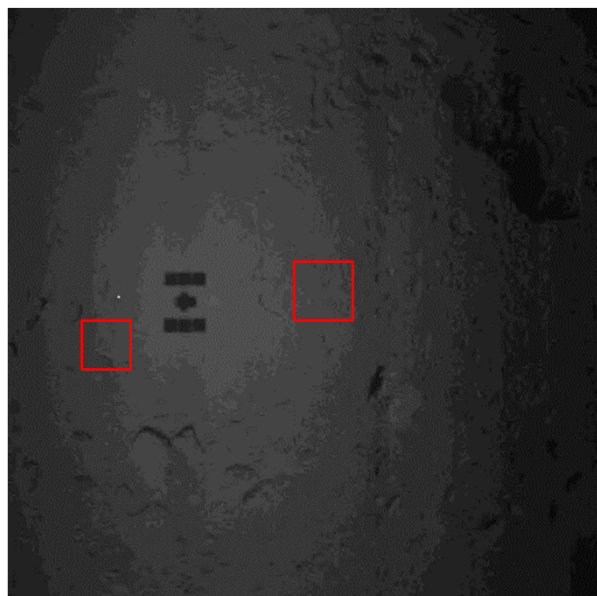
赤い円がサンプルラホーンが接地したと考えられる場所。緑の円内がタッチダウン予定地点。背景は実際のリュウグウの画像。



# 第1回タッチダウン運用結果



## フライトデータ ONC-W1視野内のTM軌道

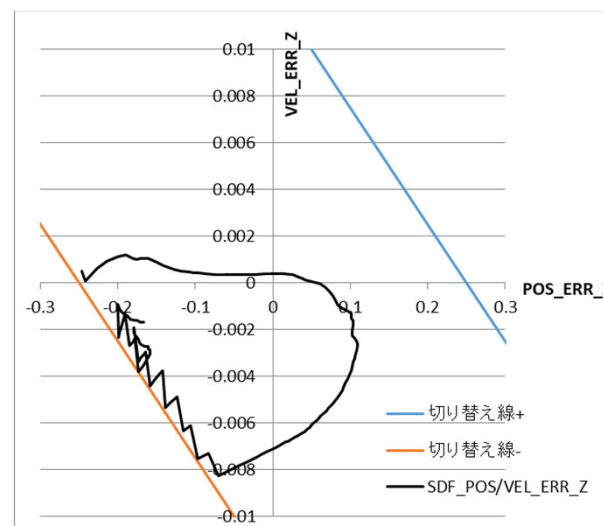
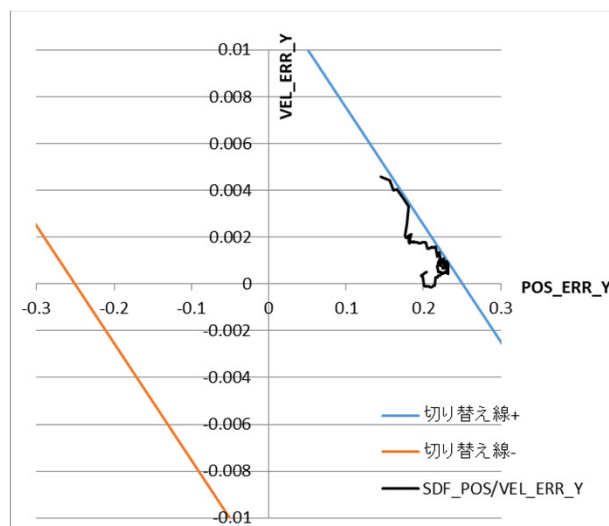
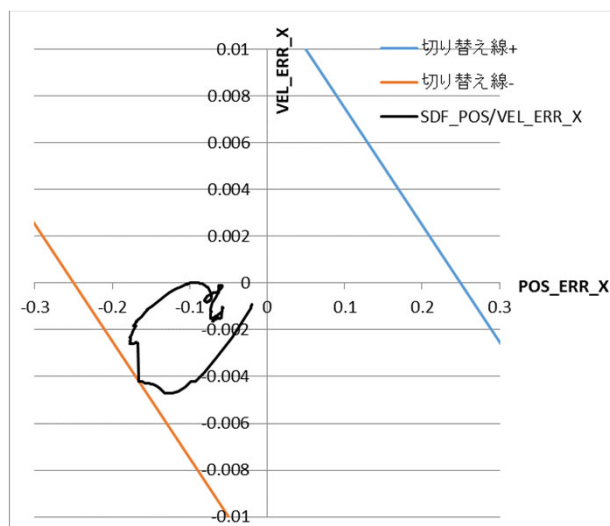




# 第1回タッチダウン運用結果

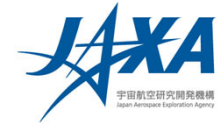


TD最終降下前 6自由度制御 位置・速度誤差  
- 位相平面 -



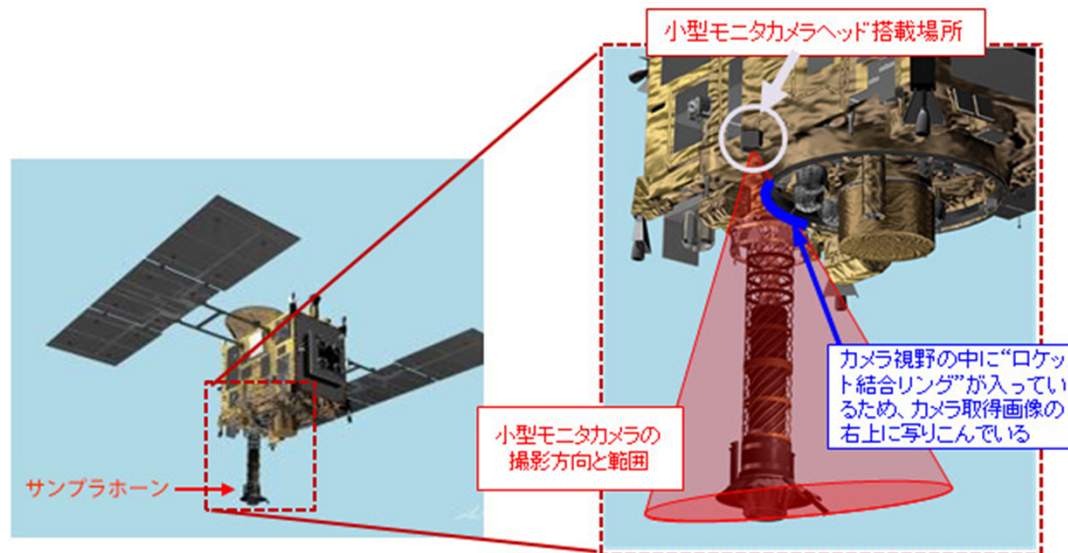


# CAM-Hによる画像



## 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)



## 第1回タッチダウン（CAM-H動画）



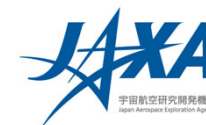
- 最終降下59秒前から連続撮像をスタートし、撮像頻度を変えながら5分40秒間撮像
- TDの瞬間は1fps(約1秒間隔)で撮像
- 最終高度は約117m

(動画、5倍速)





# 2019/02/22 PPTD(第1回TD)成功！



2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



## はやぶさ2 画像航法誘導制御系での自律制御と手動制御

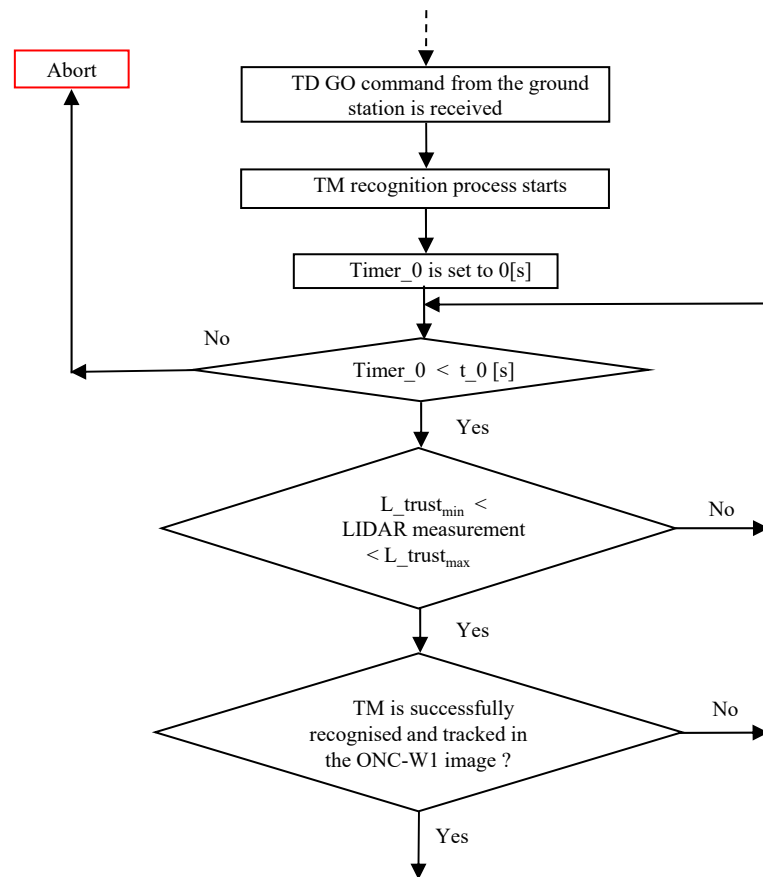


- 「失敗は許されない」という極めて保守的な宇宙開発において、地上のオペレーターの判断の介在と搭載計算機による自律機能とのバランスを取った以下の①、②の切り替えによる信頼性の高い自律機能を実現
- ① 探査機から送られてくる小惑星画像に基づき地上で計測・推定・予測、地上から軌道制御コマンドを送るGCP-NAVで降下(高度45mまで)
  - 不確定性の高い画像計測は、地上との通信遅延時間が約20分という制約の下でも、人間が地上で実施し、地上ツールで軌道予測→制御ΔV計算→コマンド送信、を実施するハイブリッドな軌道制御系構成
  - 往復伝搬遅延が更に長くなることが予想される今後の小惑星探査においては搭載系による自律画像計測が必要となると予想される。はやぶさ2でも検討は実施していたがスケジュールと予算の制約で実現は断念。
- ② GCP-NAV降下以降の低高度域(高度45m以下)では、搭載ソフトウェア内の、事前に組み替えてアップロード可能な条件分岐を含む自律シーケンス GSP (Guidance Sequence Program)を駆使してタッチダウン
  - 地上との通信遅延時間が約20分という距離でのRyugu探査においては、Ryuguの高い不確定性(形状、表面凸凹、表面反射特性)への対処、異常検知、緊急離脱の観点で自律機能が不可欠
  - 人工的なランドマークであるTM(Target Marker)を駆使した信頼性の高い画像処理とレーザセンサに基づいた小惑星相対6自由度(位置・姿勢)航法・誘導・制御
  - GSPの条件分岐の構成やパラメータ設定は小惑星到着後の観測結果に基づき決定
  - パラメータ設定は、予測に基づくFeed Forward(計測・推定値の精度・信頼性が低い場合)とその場の探査機の計測・推定値に基づくFeed Back(計測・推定値の精度・信頼性が高い場合)の組み合わせ
  - 事前設定を含むGSPの機能を地上で人間が介在することなく探査機が実現する完全自律化は将来の深宇宙探査の課題



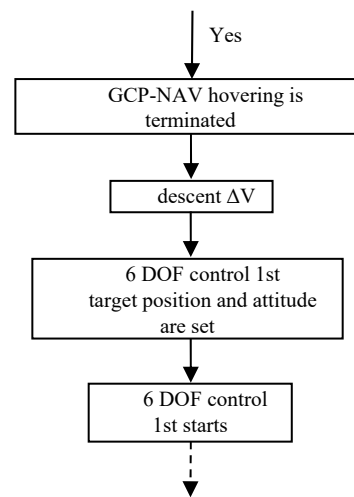
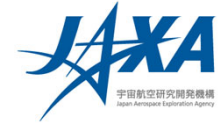


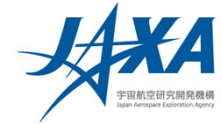
# GSPシーケンス例: GCP-NAVホバリング→TM捕捉→TD降下開始 (1/2)





## GSPシーケンス例： GCP-NAVホバリング→TM捕捉→TD降下開始 (2/2)





# 小惑星近傍フェーズ : 2019/04/06 SCI分離運用

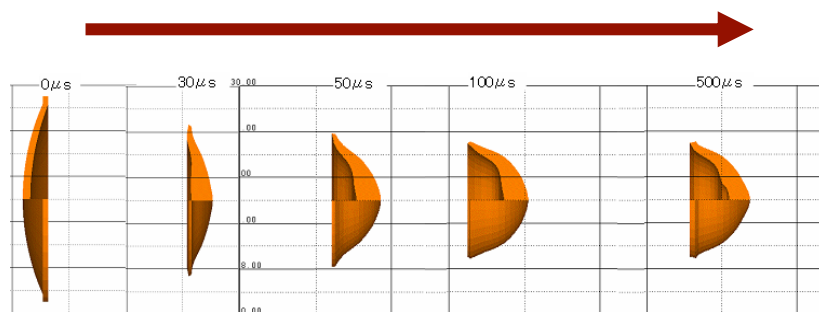


## 衝突装置

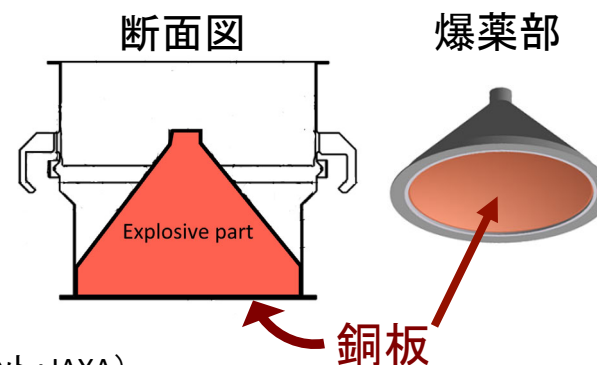


### 衝突装置 (SCI: Small Carry-on Impactor)

- ◆ 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



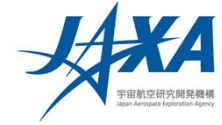
銅板(ライナ)が変形しながら飛んでいく

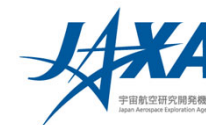


(画像のクレジット: JAXA)



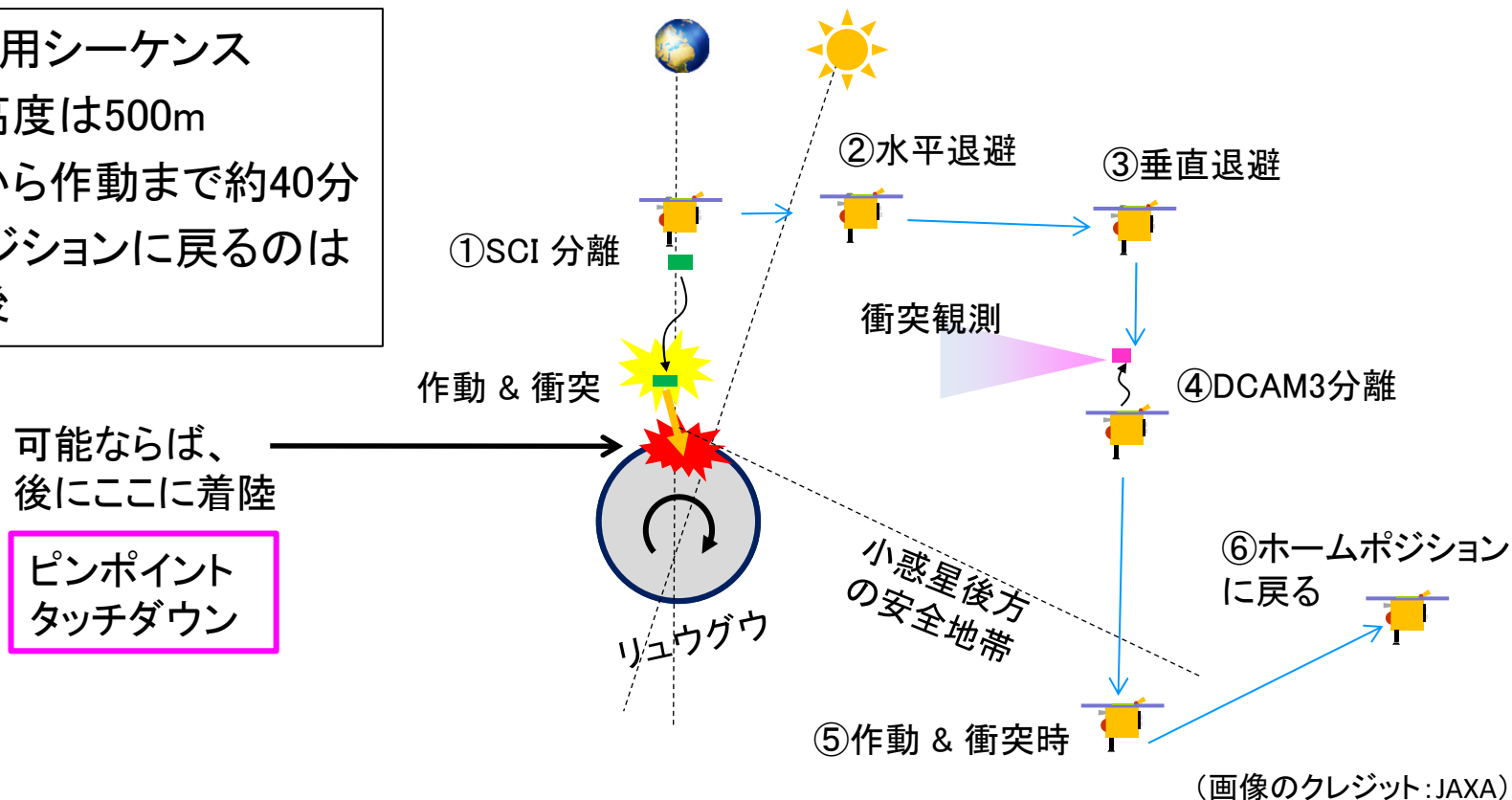
## 衝突装置の地上試験(衝突側)





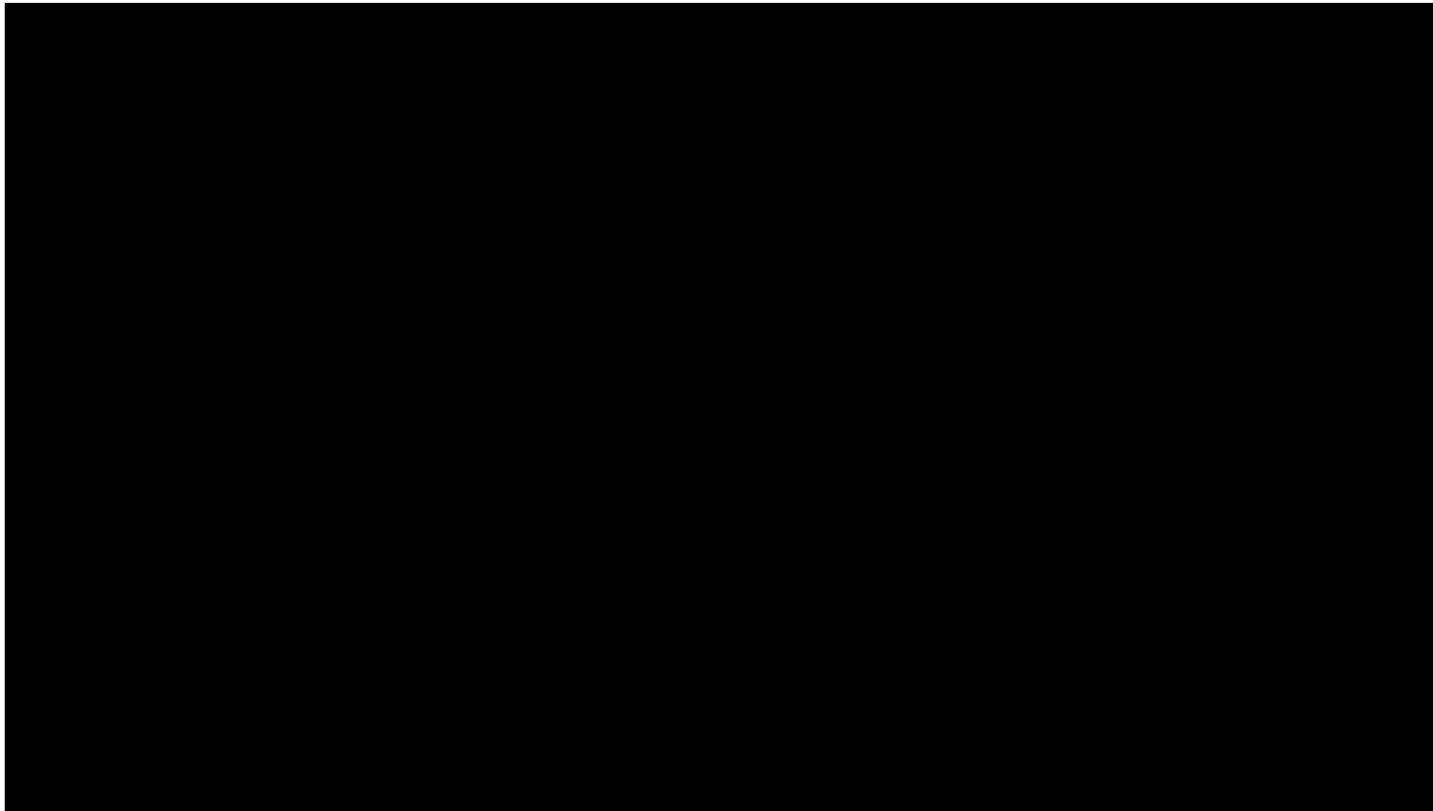
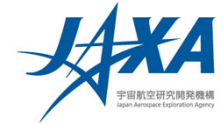
## SCI(衝突装置)分離運用

- 衝突装置運用シーケンス
- SCI分離高度は500m
  - SCI分離から作動まで約40分
  - ホームポジションに戻るの約2週間後





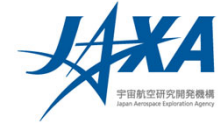
## DCAMによるイジェクタの撮像



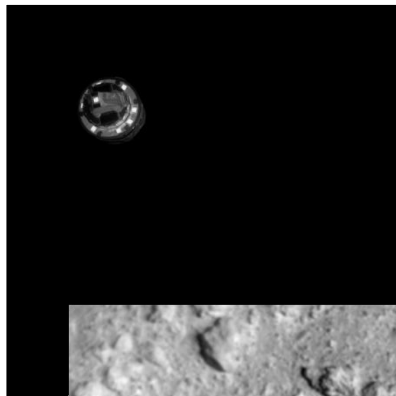


2019/04/05

# 衝突装置 (SCI) 分離運用結果



## 分離された衝突装置 (SCI)



ONC-W1  
で撮影

(画像クレジット：ONC※)

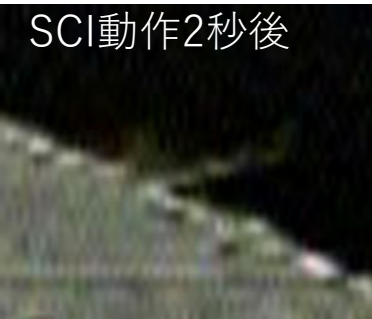


TIRで  
撮影

(画像クレジット：TIR※)

## SCIの衝突によるイジェクタ

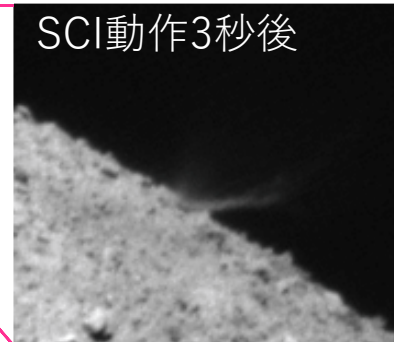
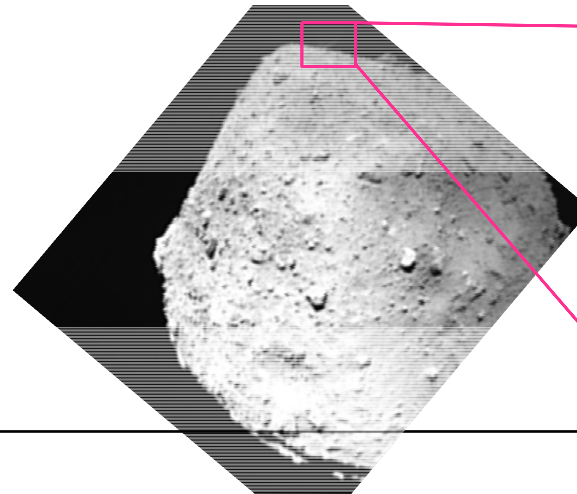
DCAM3：アナログ系で撮影



SCI動作2秒後

(画像クレジット：DCAM3アナログ※)

DCAM3：デジタル系で撮影



SCI動作3秒後

(画像クレジット：DCAM3デジタル※)





## 2019/04/05 SCI分離運用成功！

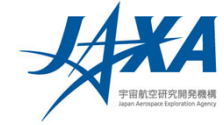


2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



## SCI衝突前後の地形変化



2019年4月25日の降下運用で確認

SCI衝突前 2019/03/22



SCI衝突後 2019/04/25

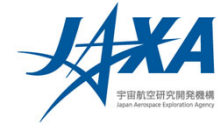


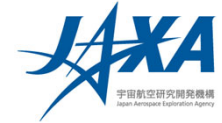
前後の比較（ブリンク画像）



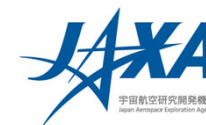


## SCIクレータの実際のサイズ感

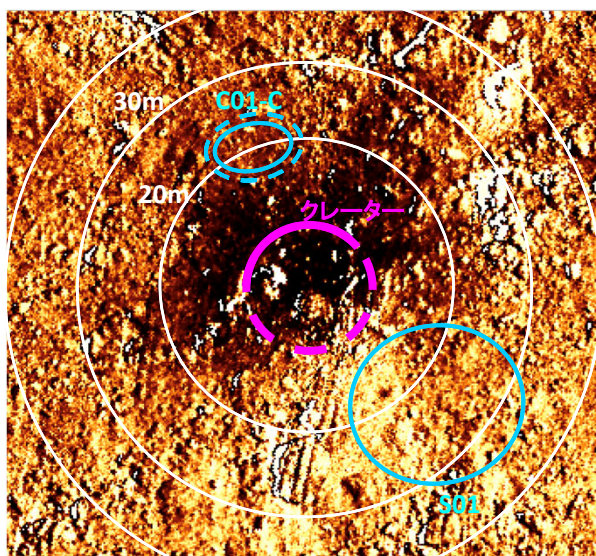




# 小惑星近傍フェーズ :2019/07/11 第2回タッチダウン 着陸地選定・運用結果



## クレータからの噴出物



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。

### C01付近のSCIクレータからの放出物

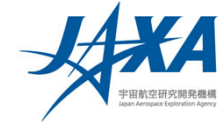
- PPTD候補地点C01-C全域に、SCIクレータからの放出物(イジェクタ、周囲より暗い)が分布。
- C01-Cのイジェクタ平均厚は暗化の空間分布から約1cmと推定される。
- C01-Cのイジェクタは、深さ0m～約1mから掘削された物質の混合物と推定される。※ 数十cm以深の層は、宇宙風化、太陽加熱、宇宙線から守られる。

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)

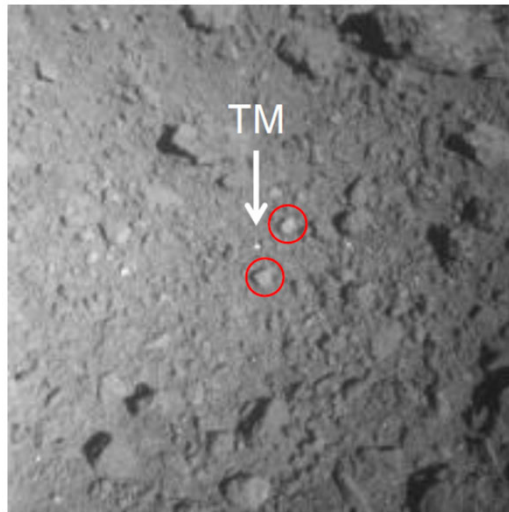


# 低高度降下観測運用(PPTD-TM1A)の結果

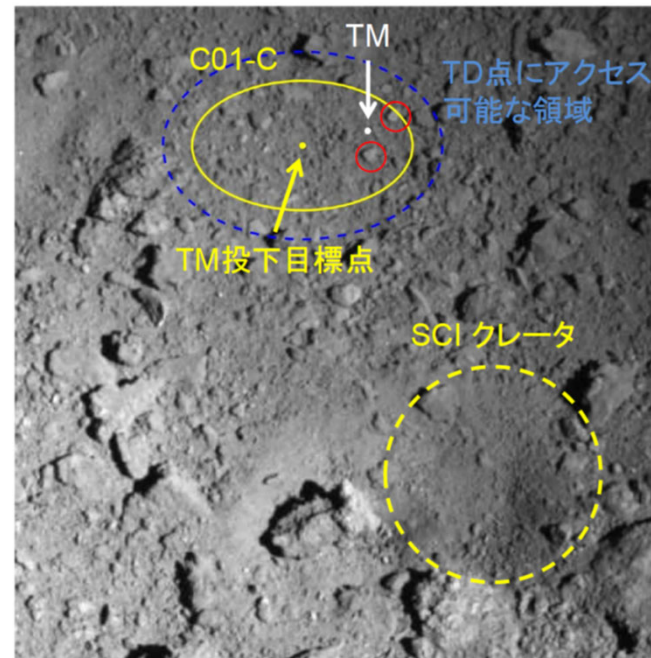
## ターゲットマーカ投下結果



- 「TD点にアクセス可能な領域」へのTM投下に成功



(TM:  
ターゲットマーカ)



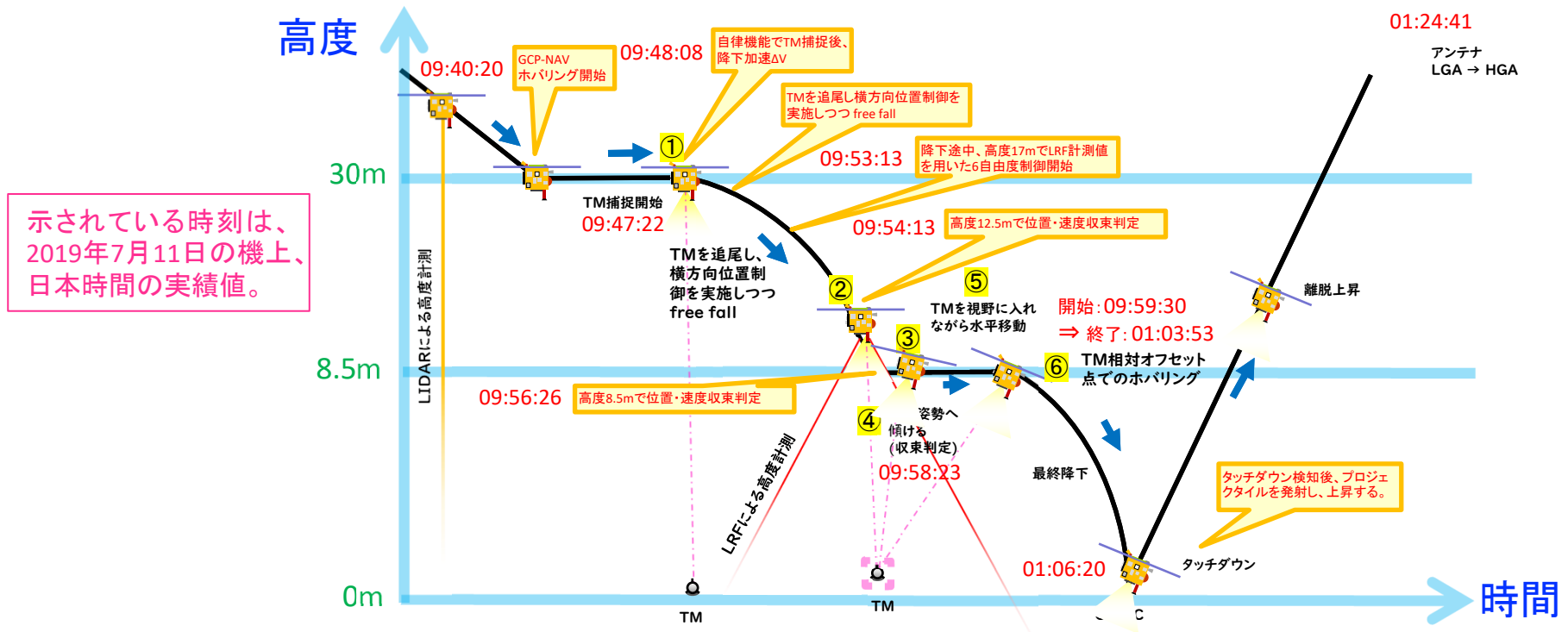
(説明図: TM  
は着地位置を  
記載したもの)

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)



# 第2回タッチダウン運用シーケンス(低高度)結果

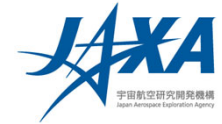


※①～④は「はやぶさ2」が次のシーケンスに進んでよいかの自律判断実施時刻

(画像のクレジット: JAXA)



## 第2回タッチダウン（CAM-H動画）



小型モニタカメラ（CAM-H）  
撮像画像を動画化  
タッチダウン前後に撮影さ  
れたもの。（10倍速の動画）

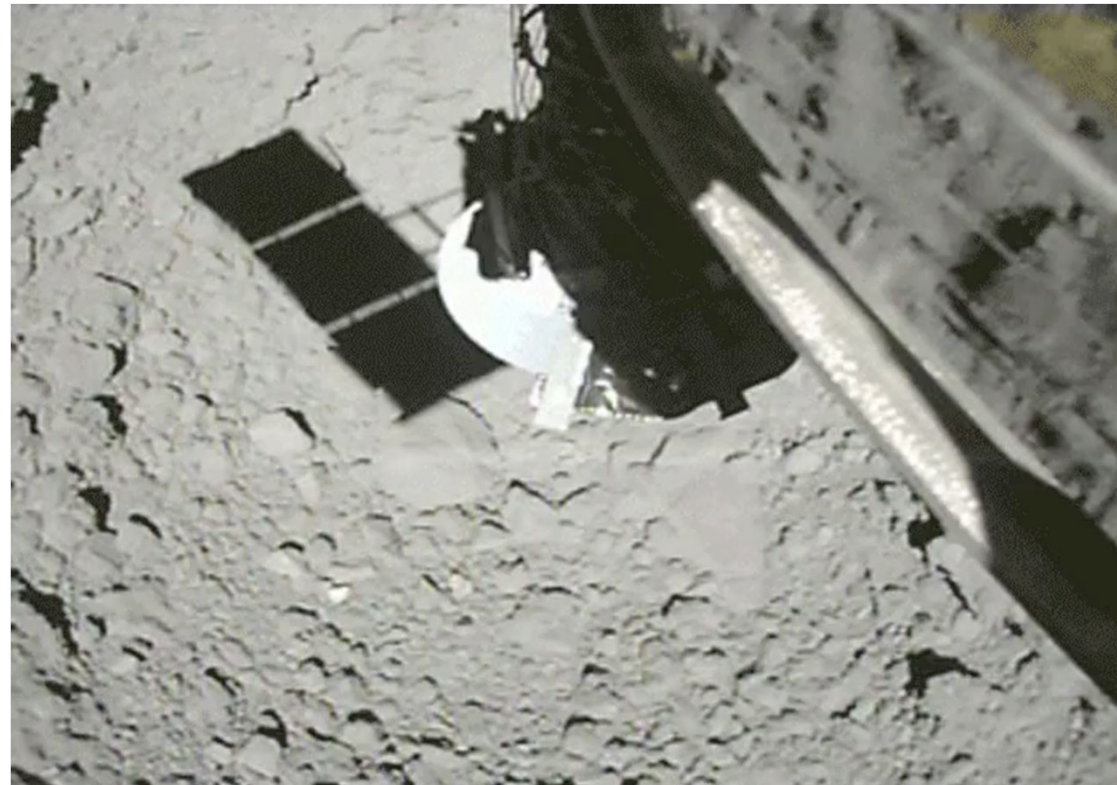
### 撮影時刻

2019年7月11日

始め 10:03:54（高度約8.5m）

終わり 10:11:44（高度約150m）

※撮影間隔は0.5秒～5秒



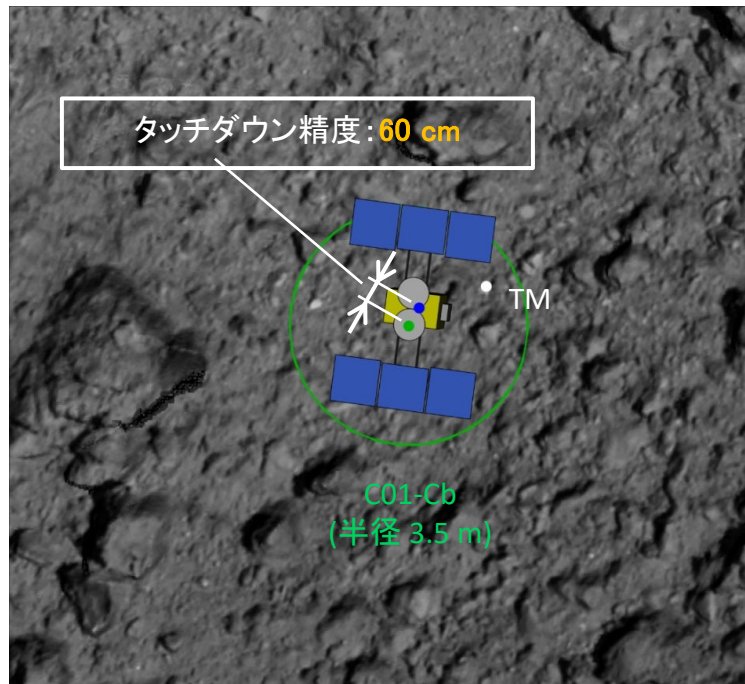




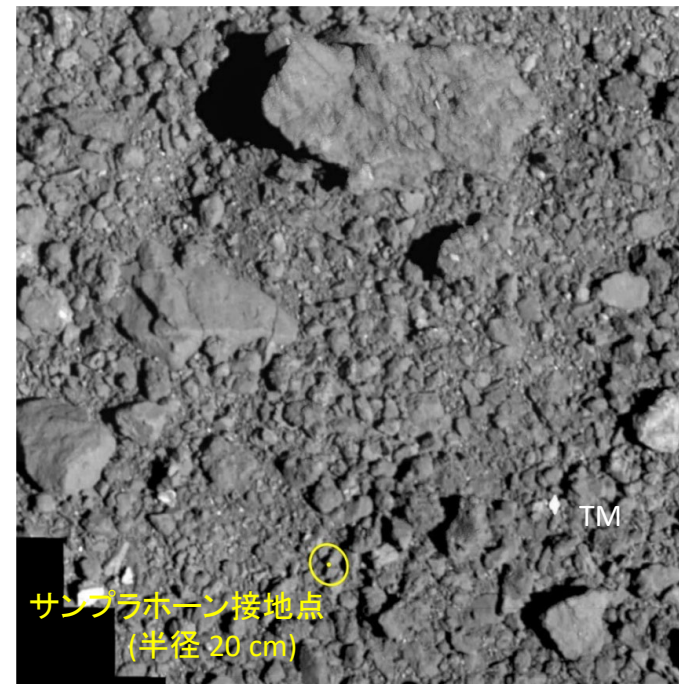
## 第2回タッチダウン精度とサンプルホーン接地点



第2回タッチダウン精度



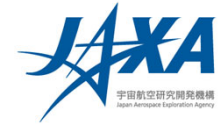
サンプルホーン接地点



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)



## 2019/07/11 PPTD(第2回TD)成功！



2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



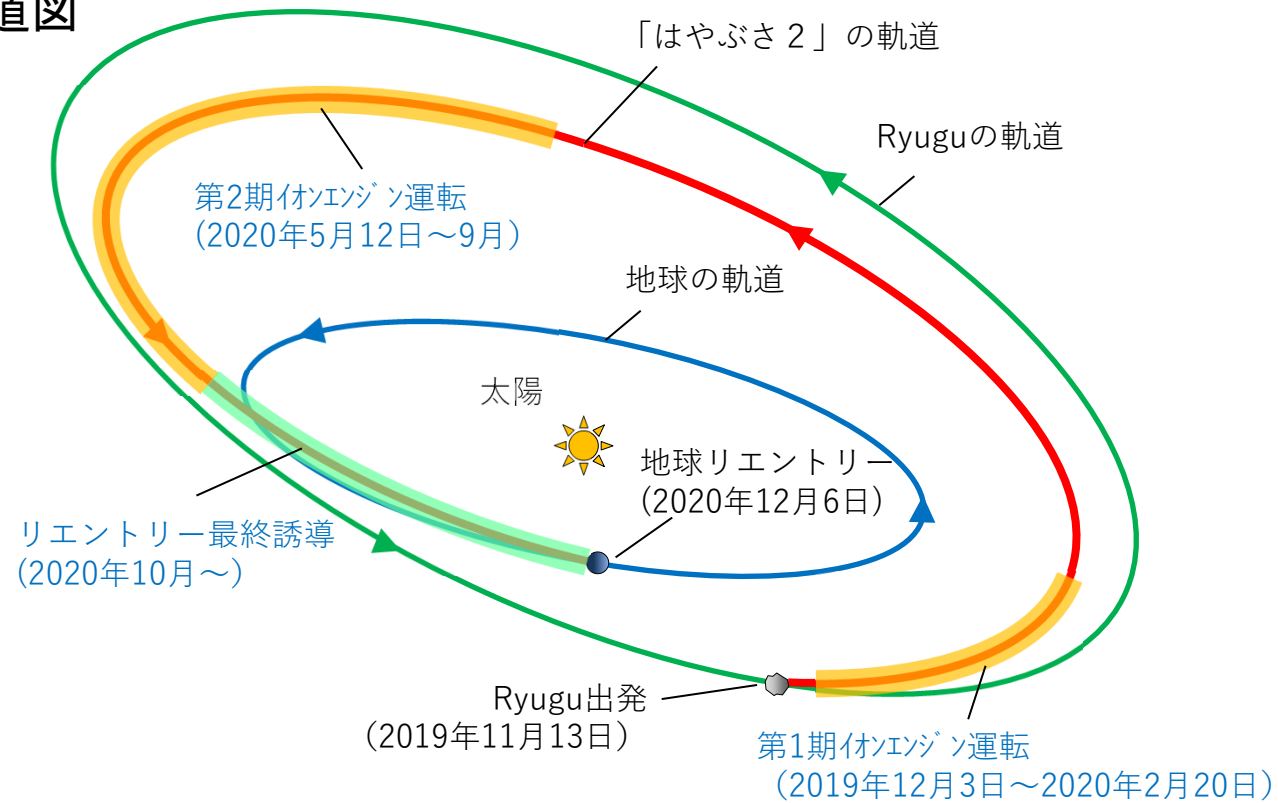
# 地球帰還



# 帰還巡航運用計画



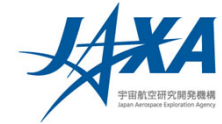
帰還フェーズ軌道図



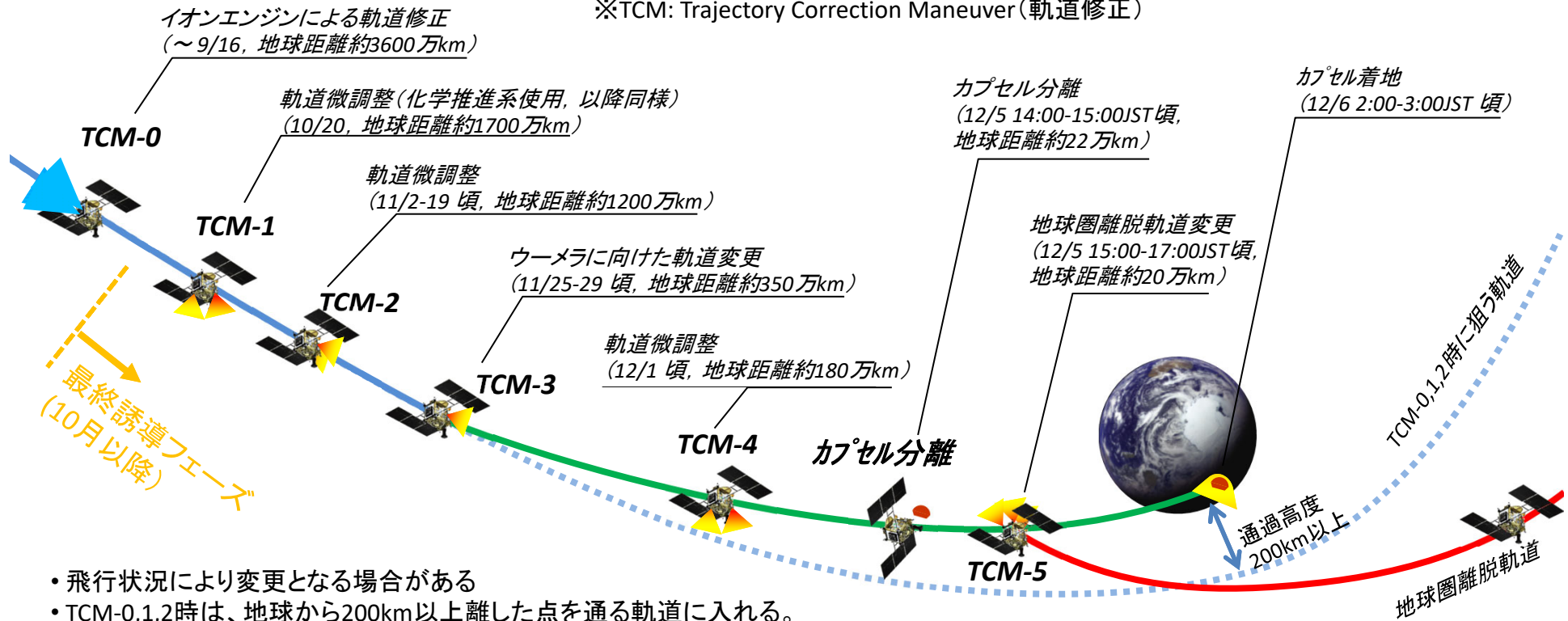
(画像クレジット: JAXA)



# リエントリー最終誘導の運用計画



※TCM: Trajectory Correction Maneuver (軌道修正)



- 飛行状況により変更となる場合がある
- TCM-0,1,2時は、地球から200km以上離れた点を通る軌道に入れる。
- カプセル分離後、TCM-5によって探査機本体は地球圏を再離脱する。

(画像クレジット: JAXA)



# 再突入カプセル回収計画



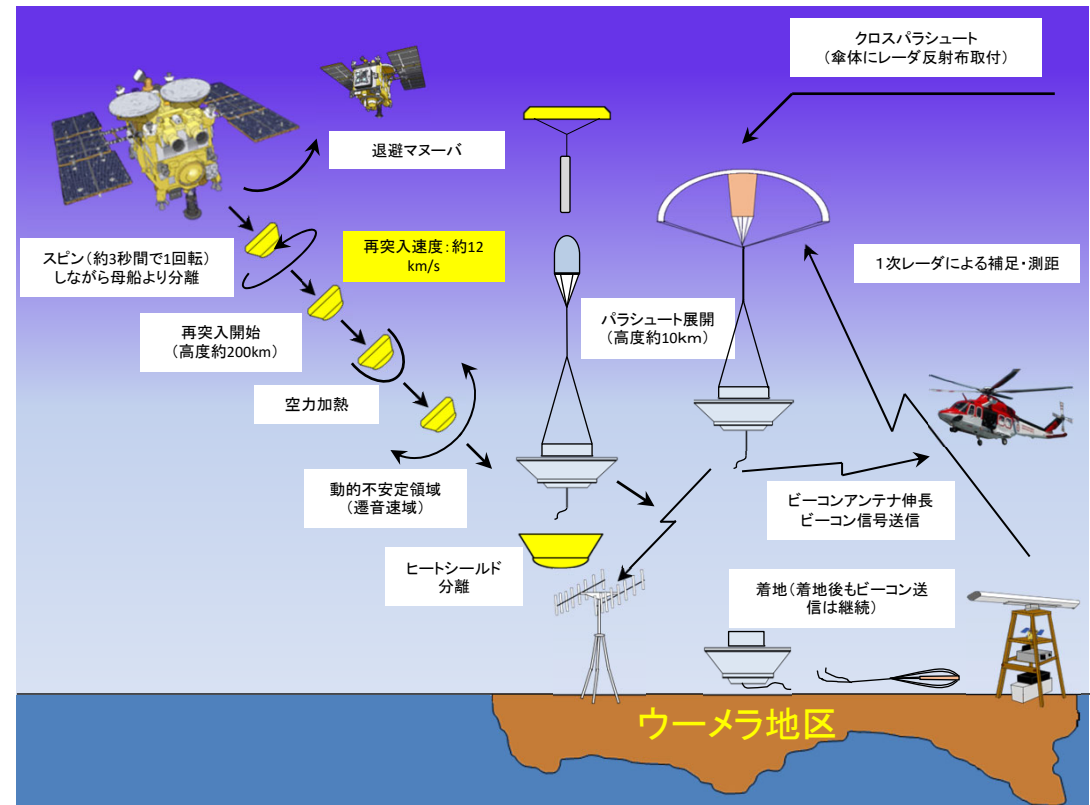
## 再突入飛行の概要

### ■ 再突入の飛行シーケンス

- 大気圏再突入  
(はやぶさ2はカプセルのみ再突入)  
↓
- ヒートシールド分離  
↓
- パラシュート開傘  
↓
- ビーコン発信  
↓
- 着地

### ■ 着地地点:

オーストラリア ウーメラ地区



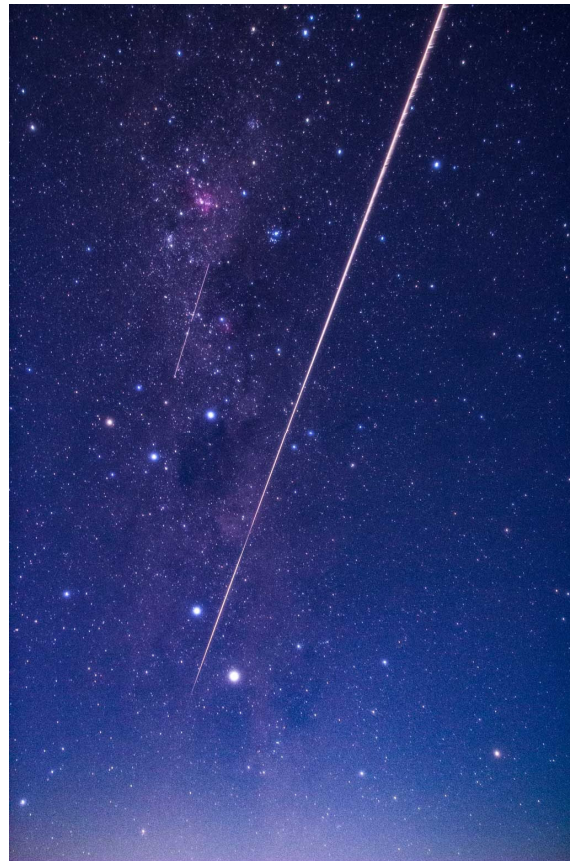
(画像クレジット: JAXA)

2021/05/29

派生開発カンファレンス2021



## 再突入カプセルのリエントリ一時、火球映像



撮影時間:2020年12月6日 2:29頃(日本時間)  
撮影場所:オーストラリア クーバーペディ付近



## 小惑星探査機「はやぶさ2」の 小惑星Ryugu第1回タッチダウン時採取サンプルの確認について

2020年（令和2年）12月15日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、2020年12月15日小惑星探査機「はやぶさ2」再突入カプセルのサンプルコンテナ内サンプルキャッチャーA室において、第1回タッチダウン時に採取した小惑星Ryugu（リュウグウ）由来のサンプルを確認しましたのでお知らせします。

2020年12月6日に豪州ウーメラにて回収された「はやぶさ2」再突入カプセルは12月8日にJAXA相模原キャンパスに搬入され、以降、再突入カプセル内のサンプルコンテナの開封作業を行っています。12月15日11時00分にサンプルコンテナ内サンプルキャッチャーA室を開封し、第1回タッチダウン時（2019年2月22日）に採取・格納されたと考えられる小惑星Ryuguサンプルを確認しました。

引き続き、サンプルコンテナ内のサンプルキャッチャーB室、C室の開封作業を行い、サンプルの取り出しと分析作業を、キュレーショングループおよび初期分析チームにて実施します。

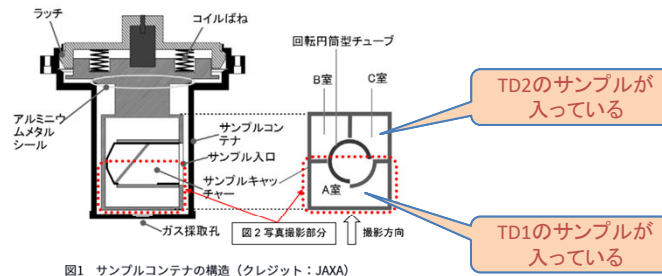


図1 サンプルコンテナの構造（クレジット：JAXA）

サンプル5.4g

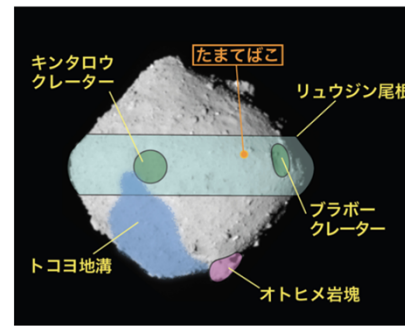


図2 サンプルキャッチャーA室内の様子（クレジット：JAXA）

図3 第1回タッチダウン地点（愛称「たまたまぼこ」）（クレジット：JAXA）

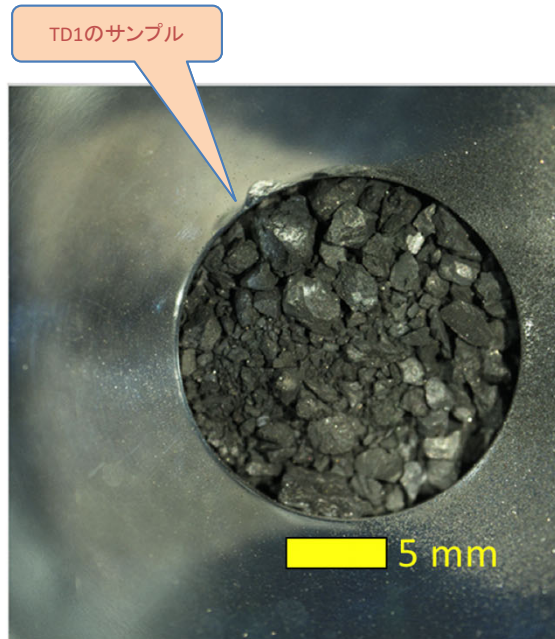
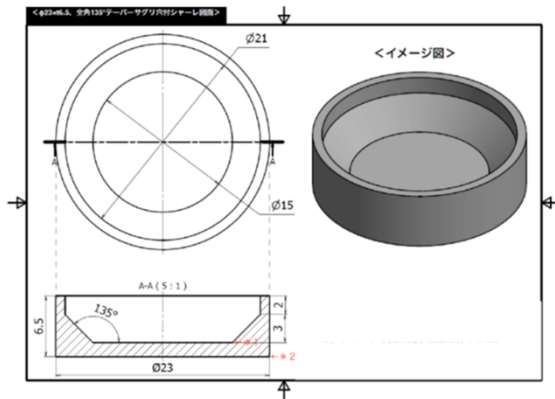
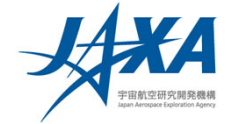
2021/05/29

派生開発カンファレンス2021





# 観察用容器内のサンプル



A室(回収容器内)の光学顕微鏡像



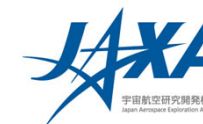
C室(回収容器内)の光学顕微鏡像



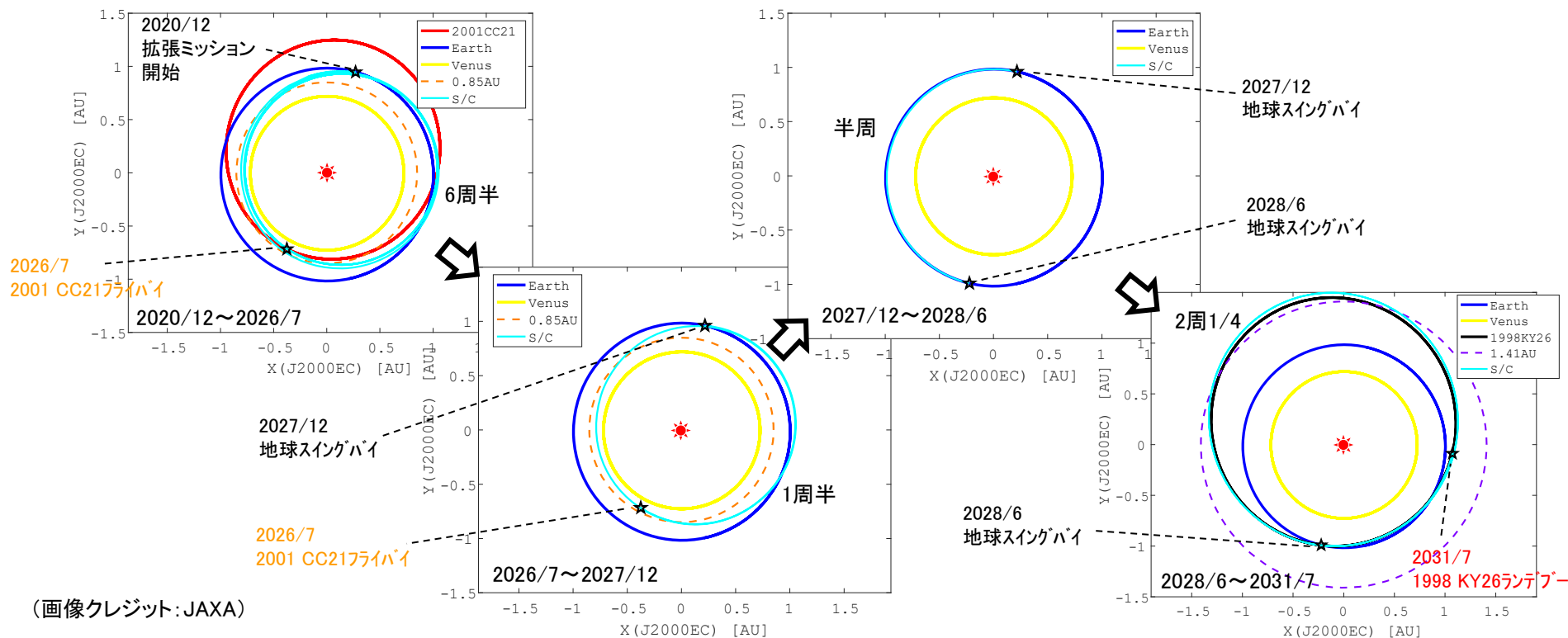
# 拡張ミッション



# 拡張ミッション選定



## EAAAシナリオ軌道シーケンス



(画像クレジット: JAXA)

2021/05/29

派生開発カンファレンス2021