小惑星探査機「はやぶさ2」の運用状況

2018年9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、

- ミッションの現状
- アストロダイナミクス
- MINERVA-II

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. Box-B運用状況

３. 小型モニタカメラ（CAM-H）

４. アストロダイナミクス

５. MINERVA-II

６. 今後の運用スケジュール

７. 今後の予定

「はやぶさ2」概要

目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用の解明することで、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

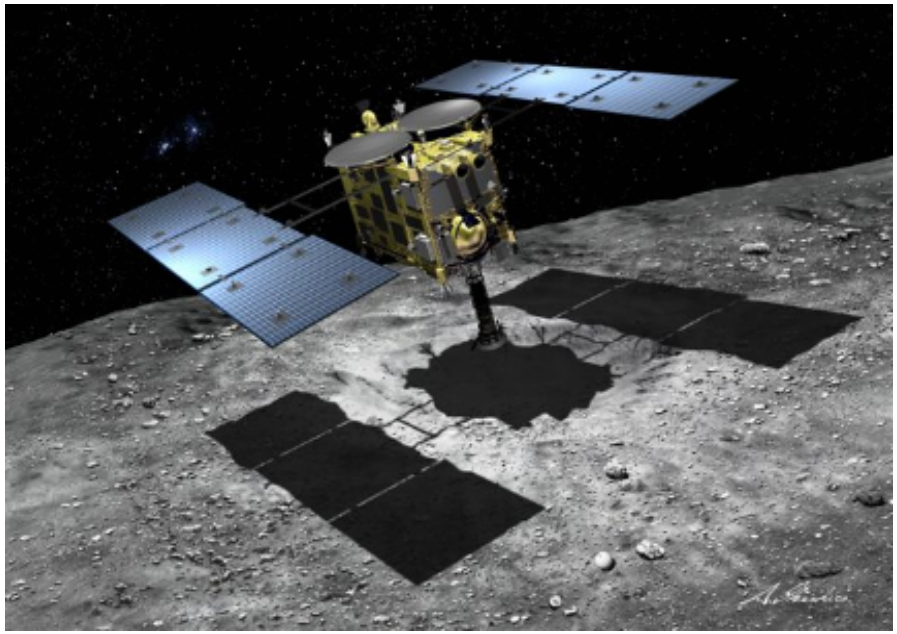
・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

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）
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）

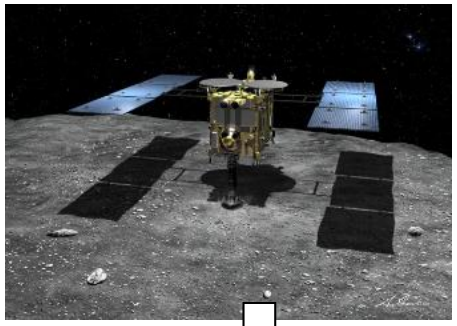
主要搭載機器
サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器（近赤外、中間赤外）、衝突装置、小型ローバ

ミッションの流れ概要

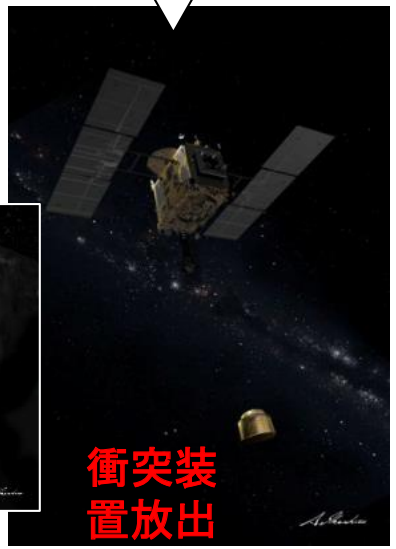
打上げ
2014年12月3日

▲
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

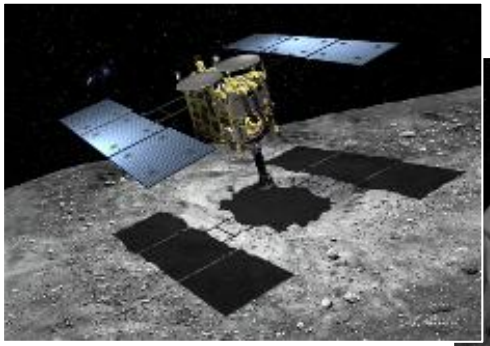


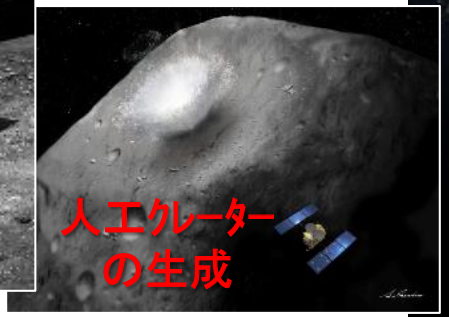
リモートセンシング観測によって、小惑星を調べる。その後、小型ローバや小型着陸機を切り離す。さらに表面からサンプルを取得する。



衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレーターを作る。

小惑星出発
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。

地球帰還
2020年末ごろ

サンプル分析

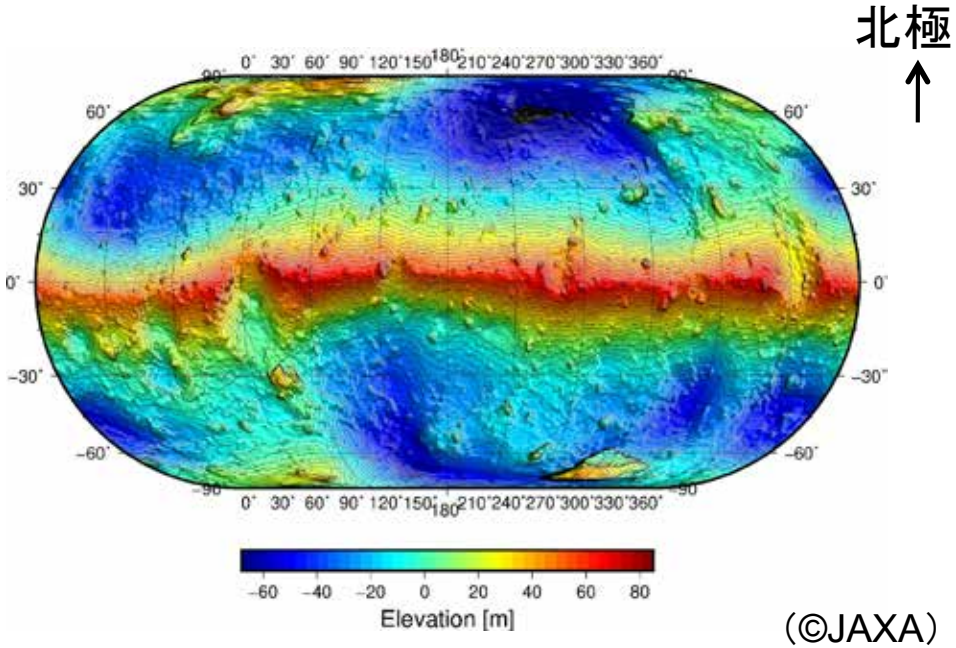
（イラスト 池下章裕氏）

座標系の注意点

小惑星の向きに注意！

今後は原則、リュウグウの北極を上で表示します。

（©JAXA、会津大など）



（©JAXA）

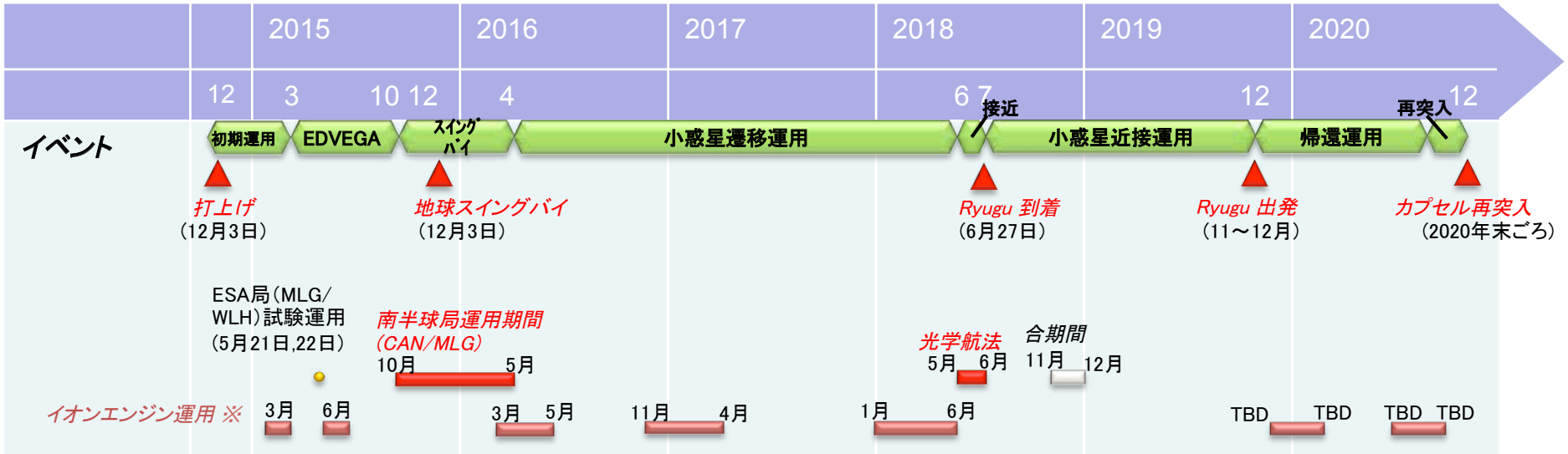
リュウグウの“地図”の例

1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

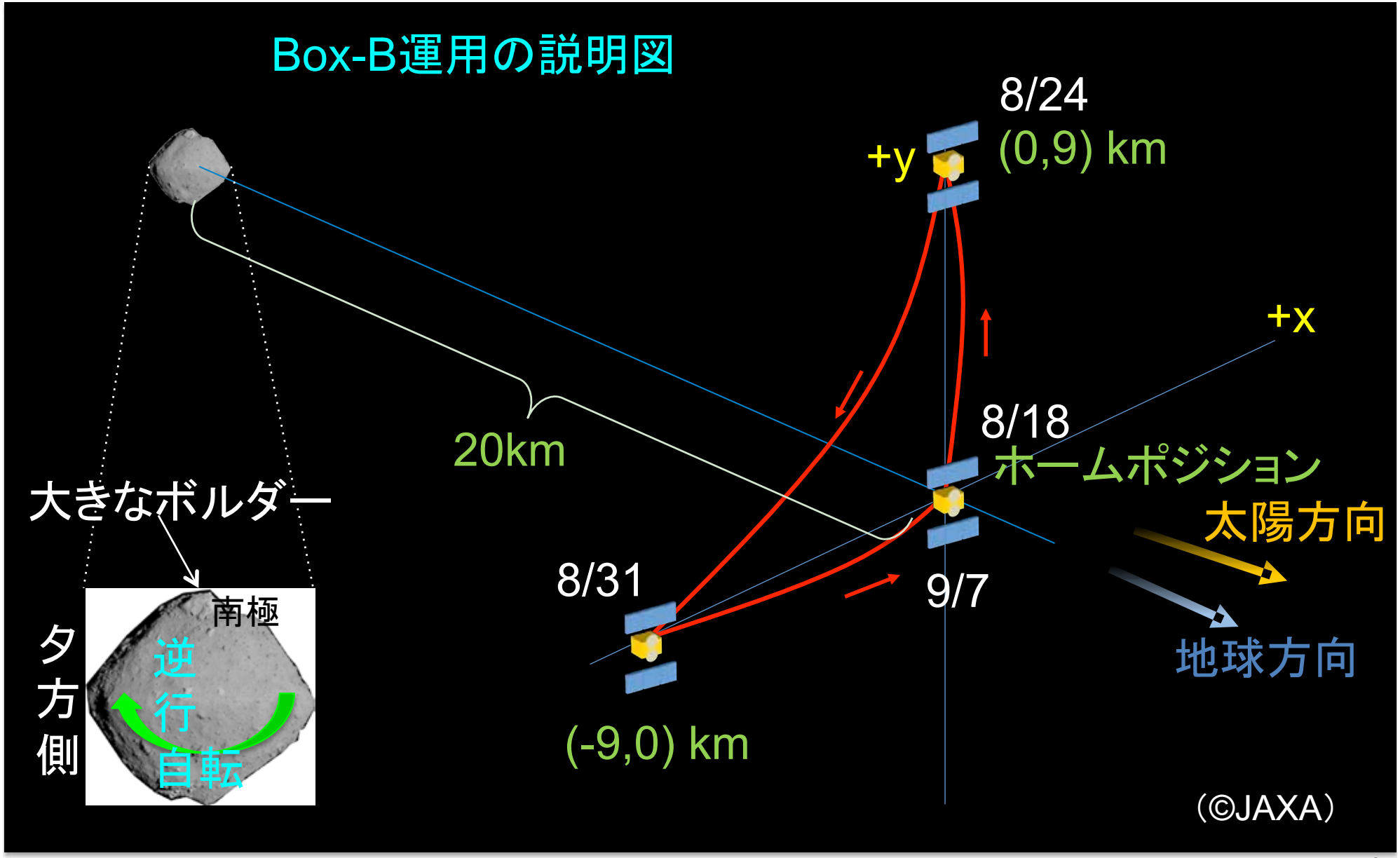
現状：

- 8月18日からBox-B運用を開始した。8月24日には+y方向に9kmの位置に達し、その後、8月31日には-x方向に9kmの位置に達した。リュウグウの南極周辺および夕方側の撮影が目的。
- 9月、10月に行う接近運用についての準備を行っている。
- タッチダウン運用リハーサル1は、9月11日から12日に行う予定。

全体スケジュール：

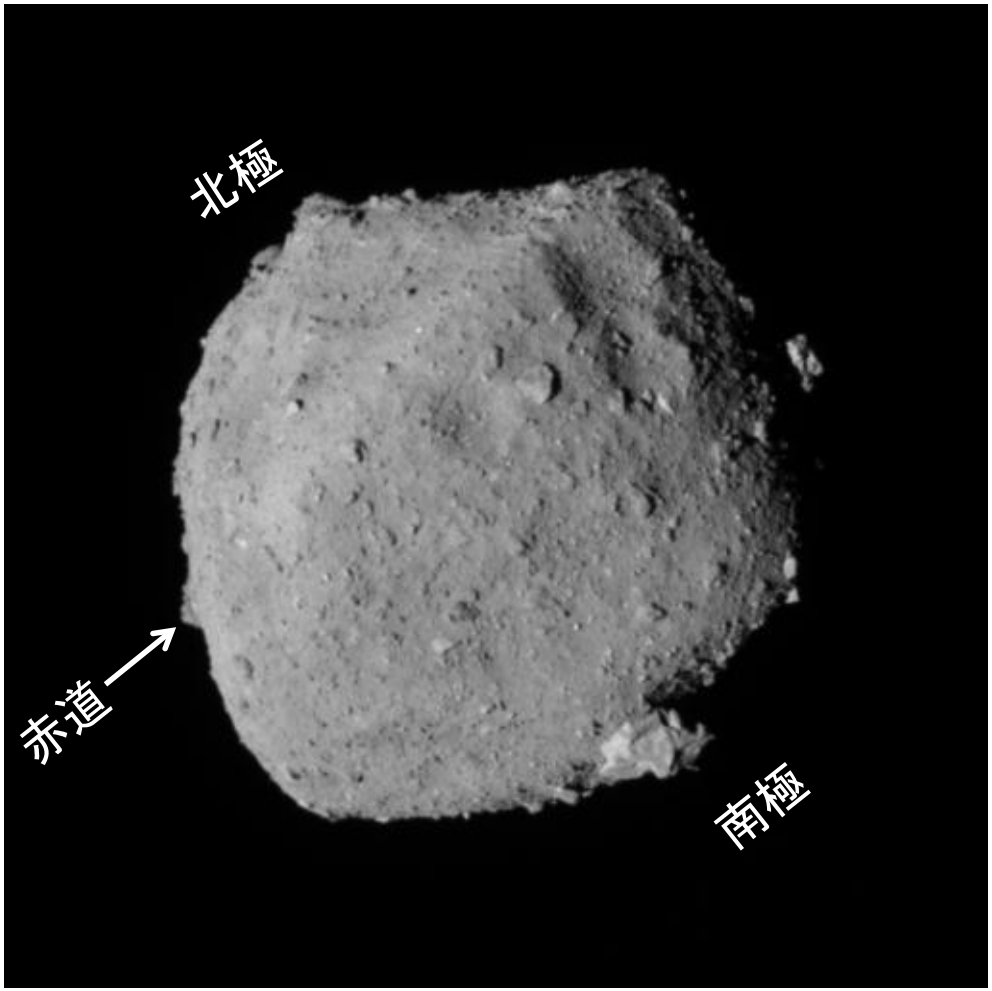


2. Box-B運用状況


Box-B運用の説明図
8/24
(0,9) km
+y
+x
8/18
ホームポジション
20km
大きなボルダー
太陽方向
8/31
9/7
地球方向
南極
逆
行
自転
夕
方
側
(-9,0) km
(©JAXA)

2. Box-B運用状況

Box-B運用で撮影したリュウグウ

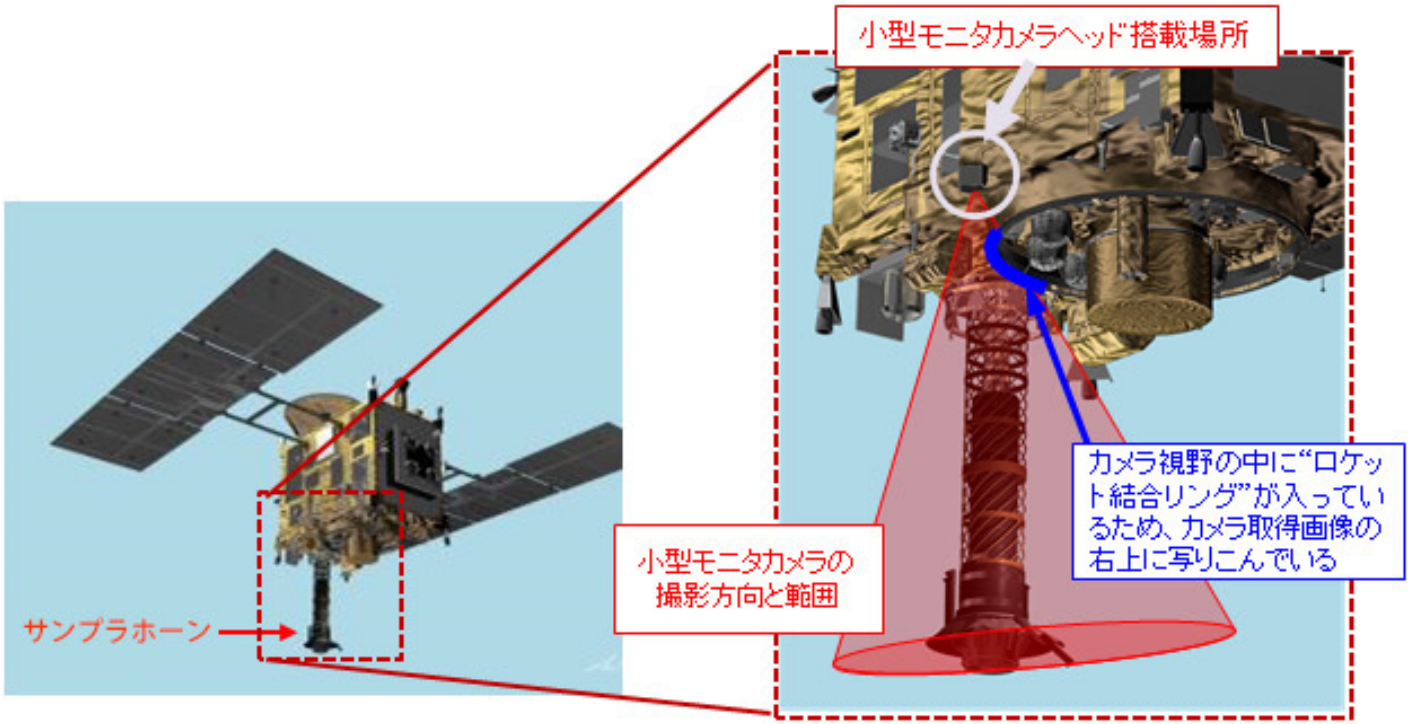


2018年8月24日、17時頃（日本時間）に望遠の光学航法カメラ（ONC-T）によって撮影。+y=9km付近からの撮影となる。リュウグウまでの距離は約22km。

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

3. 小型モニタカメラ（CAM-H）

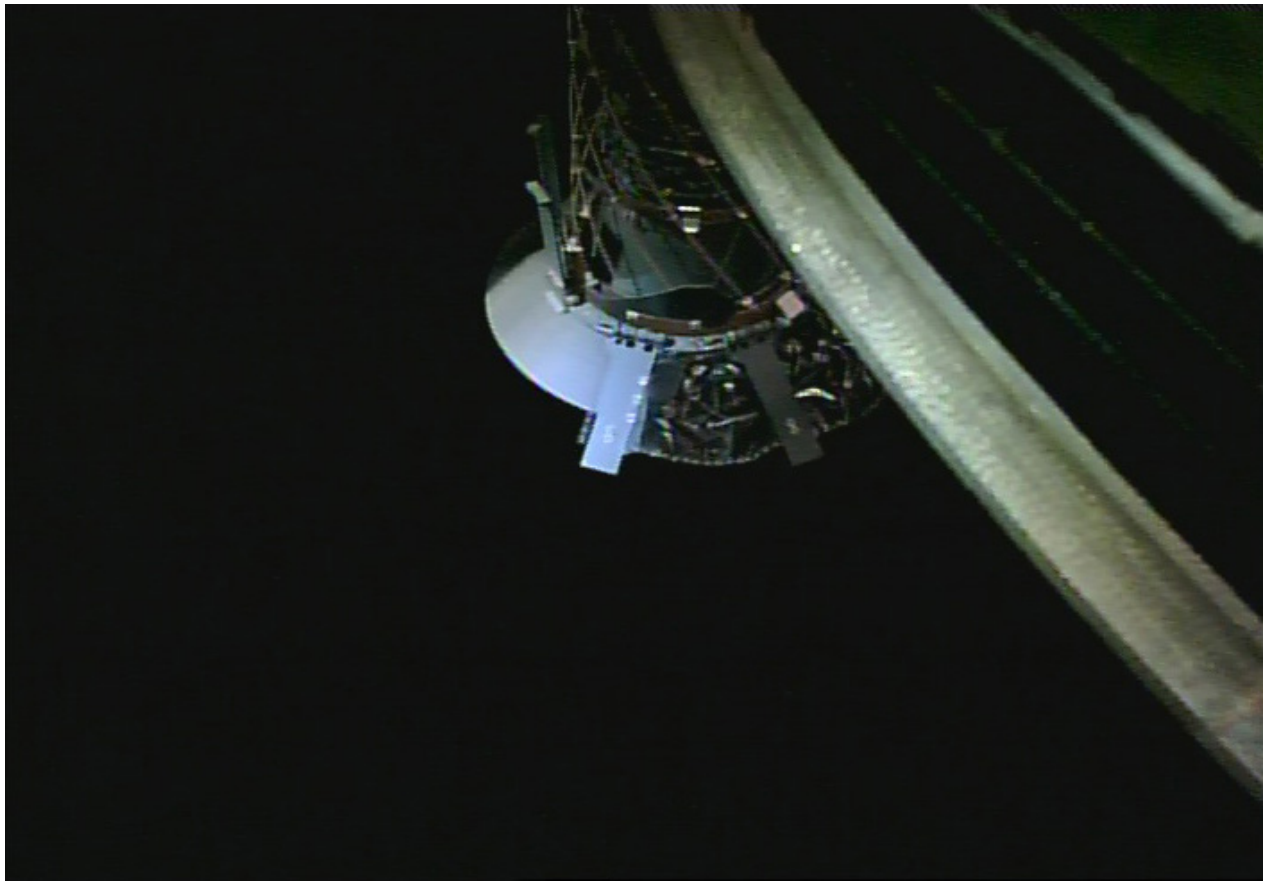
- 寄附金により製作・搭載されたカメラ
- サンプラホーンを撮影



（©JAXA）

3. 小型モニタカメラ（CAM-H）

直近のサンプラホーンの様子

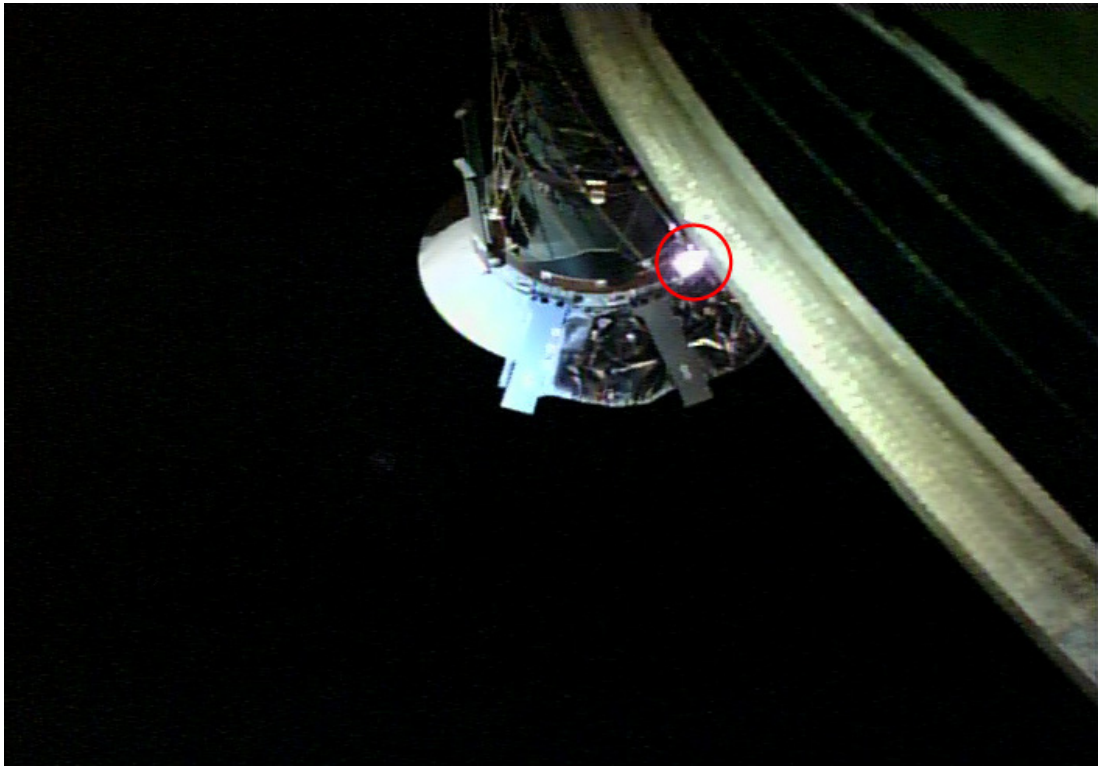


2018年8月14日に小型モニタカメラ（CAM-H）によって撮影されたサンプラホーン

（©JAXA）

3. 小型モニタカメラ（CAM-H）

参考



2018年4月16日に小型モニタカメラ（CAM-H）によって試験撮影されたサンプラホーン。赤丸の中の光っている部分がLRF-S2のレーザが照射されているサンプラホーンのターゲット板である。

2014年12月5日に小型モニタカメラ（CAM-H）によって試験撮影されたサンプラホーン

（©JAXA）

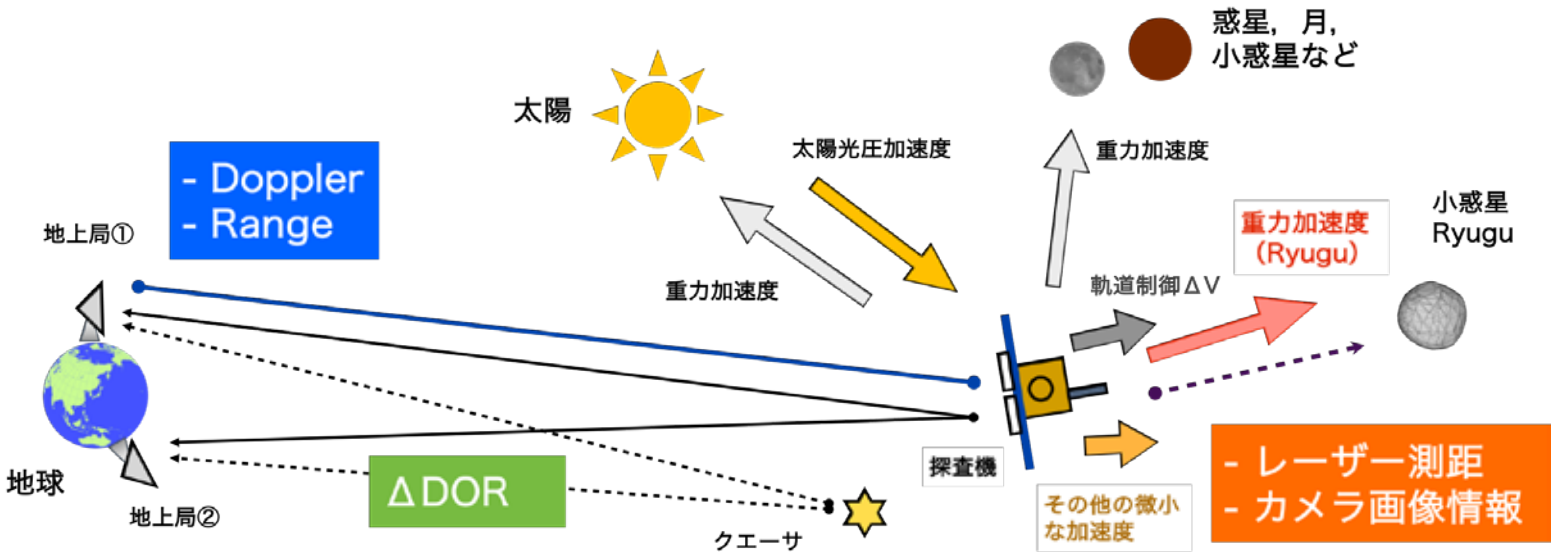
4. アストロダイナミクス

- アストロダイナミクスとは？
  - 宇宙工学上で扱われる飛行力学全般
  - 軌道運動、姿勢運動、航法・誘導・制御など
- はやぶさ2アストロダイナミクスチームの活動
  - はやぶさ2探査機および小惑星Ryuguの軌道推定
  - 小惑星Ryuguの重力場モデルの作成および評価
  - 小惑星近傍での軌道運動評価
  - 探査機運用に用いる小惑星パラメータの推定および実運用システムへの反映
- これまでの観測でわかったこと
  - 小惑星の重力（質量）
  - 小惑星近傍の力学環境
  - 小惑星の軌道

本日説明する項目

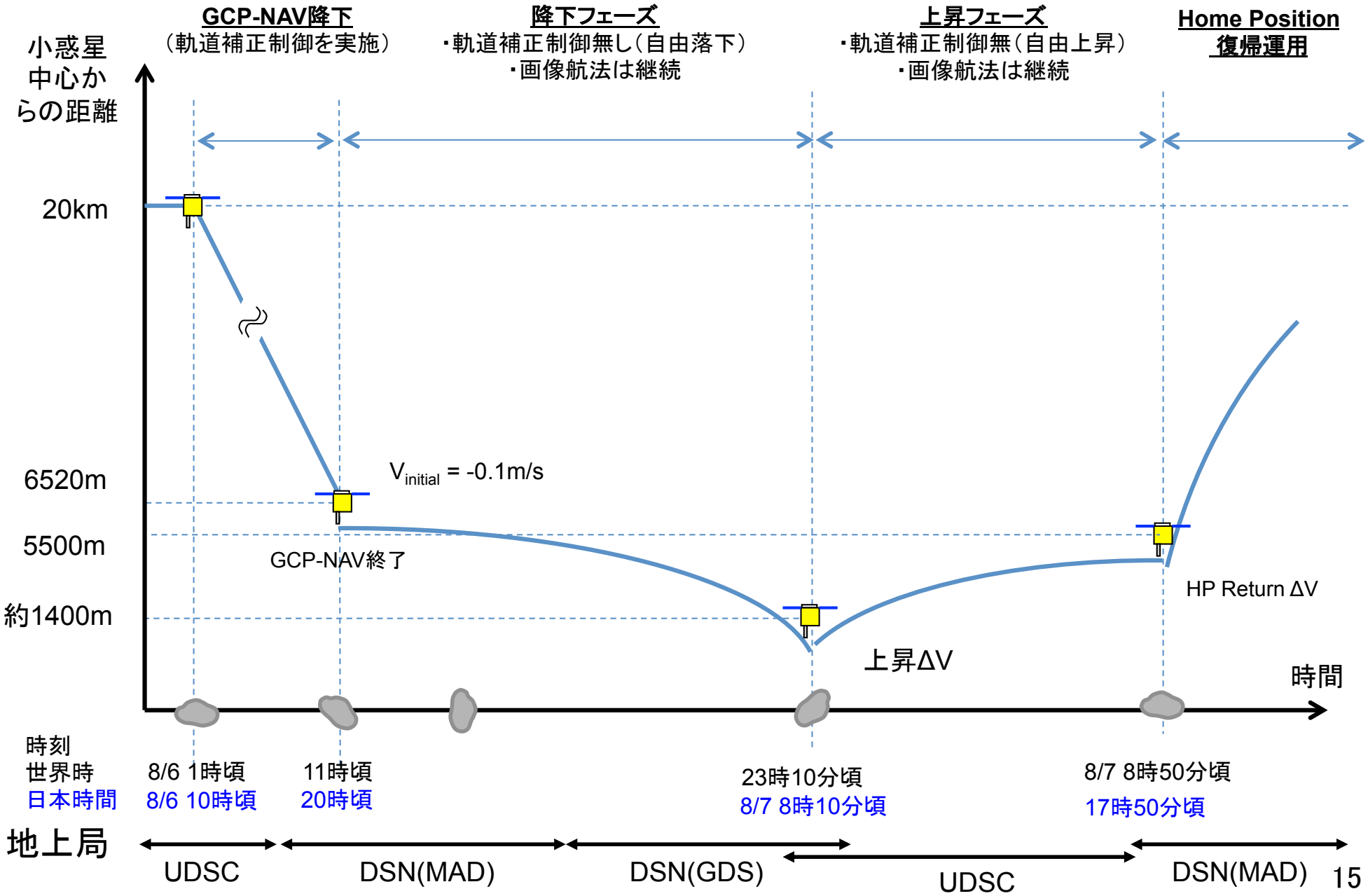
4. 小惑星の重力推定

- 解析方法
  - 地上局で取得する探査機の電波追跡データ(レンジ、レンジレートなど)、探査機がオンボードで取得する小惑星の相対観測データ(レーザ高度計、カメラ画像)を用いて、探査機の精密な軌道を求めると同時に、小惑星Ryuguによる重力加速度を推定する。
  - 重力計測降下運用(8/6-7に実施)にて取得したデータを用いて、小惑星Ryuguの重力推定を実施。形状モデルから算出した体積情報と組み合わせることで、小惑星のバルク密度を計算することができる。
  - 推定した重力情報を用いて、小惑星Ryugu近傍の力学環境を評価。



探査機の精密軌道推定のイメージ

4. 重力計測降下運用

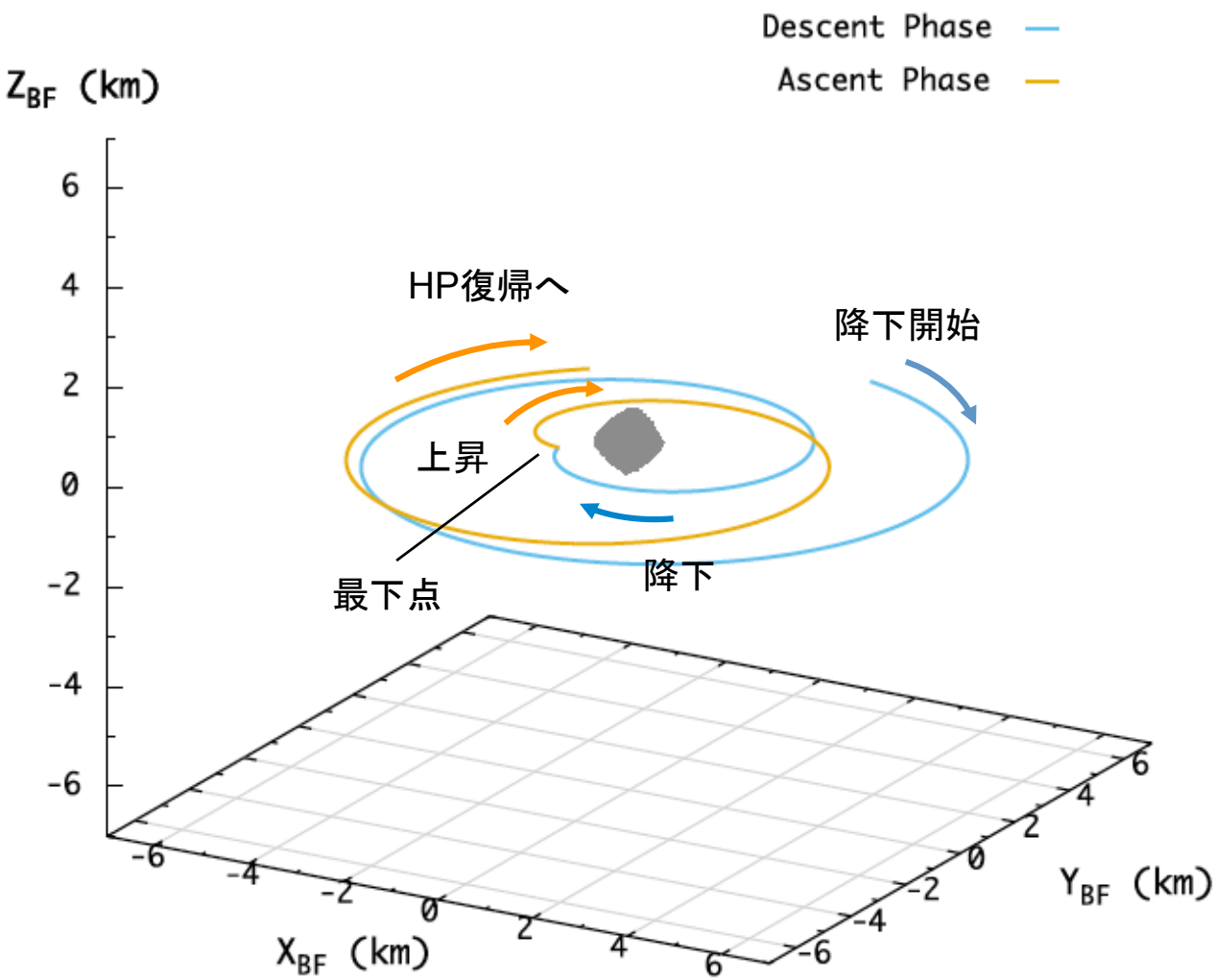

GCP-NAV降下
（軌道補正制御を実施）
降下フェーズ
・軌道補正制御無し（自由落下）
・画像航法は継続
上昇フェーズ
・軌道補正制御無（自由上昇）
・画像航法は継続
Home Position
復帰運用
小惑星
中心か
らの距離
20km
6520m
5500m
約1400m
$V_{initial}$ = -0.1m/s
GCP-NAV終了
HP Return ΔV
上昇ΔV
時間
時刻
世界時
日本時間
8/6 1時頃
8/6 10時頃
11時頃
20時頃
23時10分頃
8/7 8時10分頃
8/7 8時50分頃
17時50分頃
地上局
UDSC
DSN(MAD)
DSN(GDS)
UDSC
DSN(MAD)

4. 重力計測降下運用

- 高度約6,500mから降下フェーズ開始、約12時間程度の自由落下運動を継続。
- 最下点（高度約850m）で軌道制御ΔVを実施して、上昇フェーズに移行。
- 小惑星の自転軸の向きの関係で、小惑星固定座標系でみると、小惑星の赤道面（XY平面）で接近、上昇する軌道となる。

- 重力推定運用で求めたGM(G:重力定数、M:質量)は以下のとおり。

GM=約30 (m^3/s^2)
→　質量：約4.5億ton

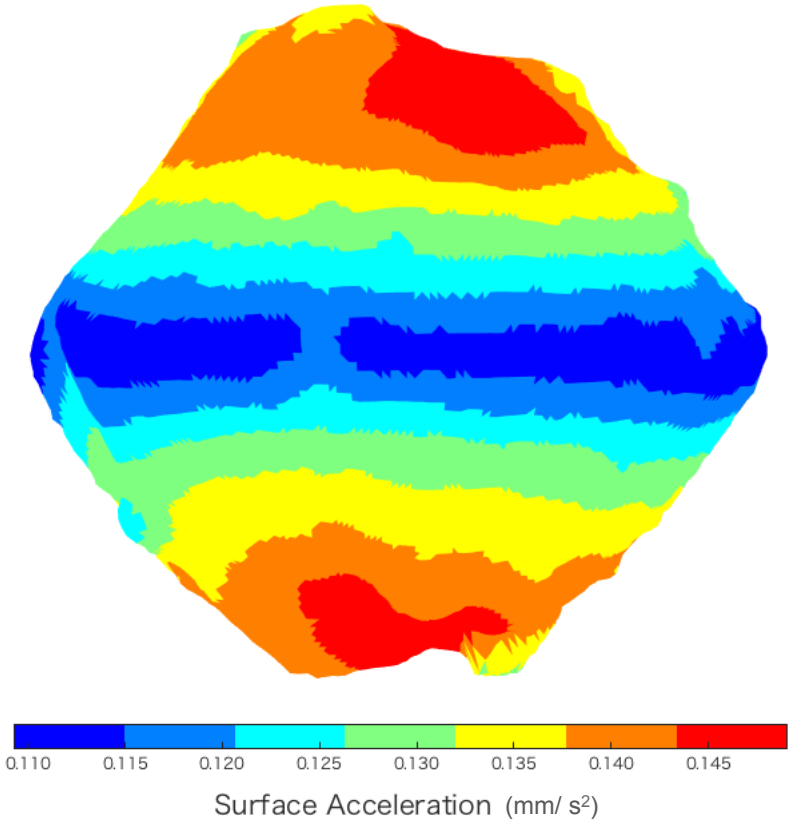


（©JAXA）

小惑星固定座標系における探査機軌道

4. 小惑星近傍の力学環境

- 推定した重力情報から小惑星表面の加速度環境を評価
- 小惑星近傍での加速度情報は今後のタッチダウン運用などに使用予定。



小惑星Ryugu表面における加速度分布　（©JAXA）

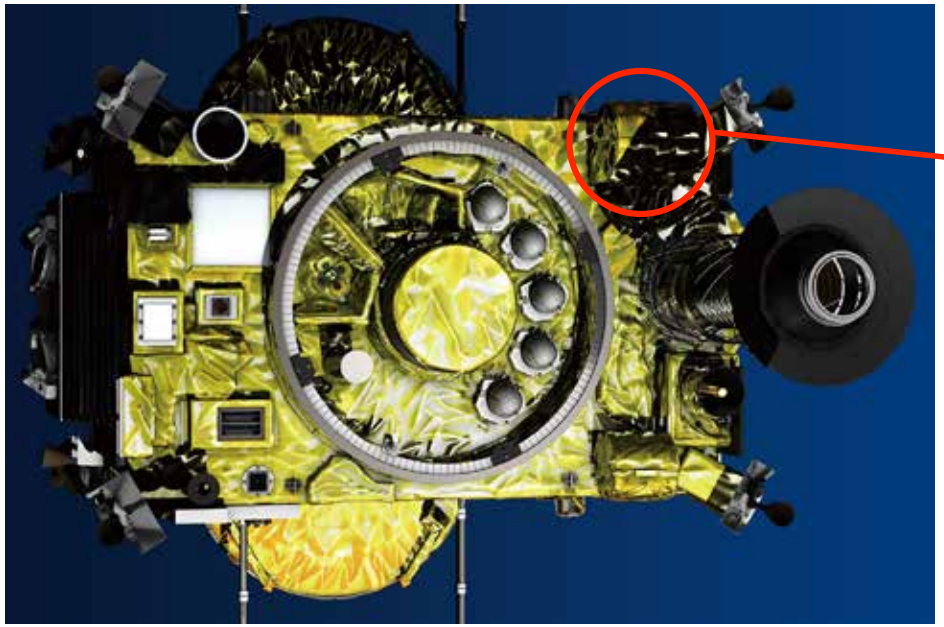
✓ 表面加速度は0.11～0.15 [mm/s^2]程度に分布

✓ 極付近の加速度が大きく、赤道付近が小さい。

✓ 赤道での重力は
- 地球の約8万分の1程度
- イトカワの数倍程度

5. MINERVA-II

MINERVA-IIは、「はやぶさ」に搭載したMINERVAの後継機



(©JAXA)

MINERVA-II1(Rover-1A, Rover-1B)

JAXA製作

＜協力メーカ、大学、団体など＞
愛知工科大学、会津大学、アドニクス、
アンテナ技研、エルナー、セシアテクノ、
東京大学、東京電機大学、デジタルスパイス、
日東光学、マクソンジャパン、DLR、ZARM

- 分離機構を含む総質
  MINERVA-II1：2.5kg
- MINERVA-II1には２つの探査ローバを搭載

5. MINERVA-II-1

小惑星探査ロボット「ミネルバ2」

MIcro Nano Experimetal Robot Vehicle for Asteroid the Second Generation

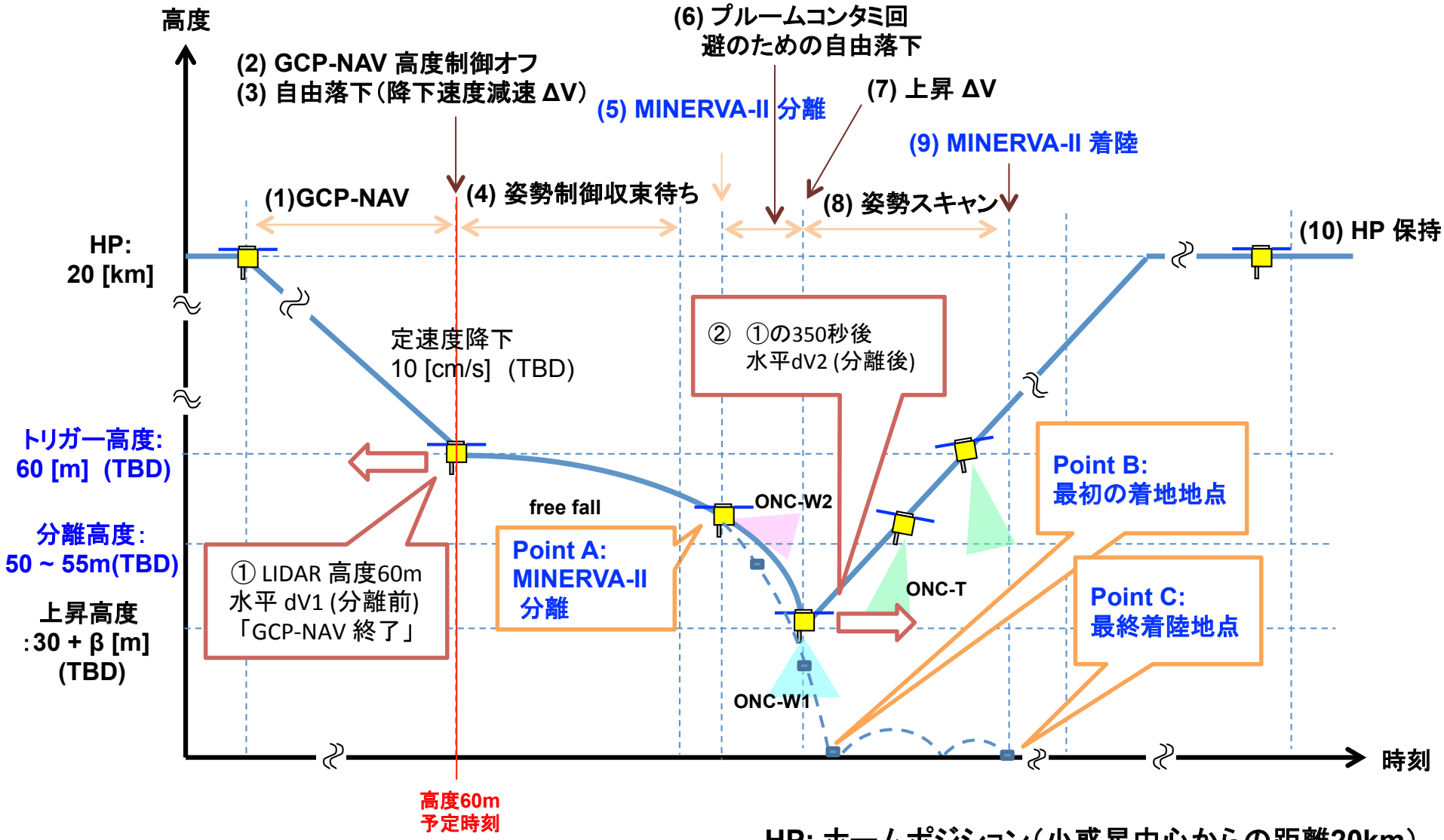
（©JAXA）

- ホッピングメカニズム
- 未知環境適応能力
- 小型・軽量・低消費電力
- 自律探査行動
- 科学観測（表面ステレオ画像・温度計測）

5. MINERVA-II1 Rover

大きさ	正十六角柱 直径: f180[mm] 高さ: 70[mm]
重量	1A:1,151[g], 1B:1,129[g]
駆動部	直流モータ　１個
搭載センサ	カメラ4個(1A), カメラ3個(1B) 光センサ, 加速度計, 温度計, ジャイロ
通信速度	32k[bps] (max)

5. 分離運用シーケンス



HP: ホームポジション（小惑星中心からの距離20km）

６. 今後の運用スケジュール

運用予定日

タッチダウン1　リハーサル1：　9月11日～12日
（最下点到達：9月12日）

MINERVA-II1運用　：　9月20日～21日
（MINERVA-II1分離：9月21日）

MASCOT運用　：　10月2日～4日
（MASCOT分離：10月3日）

タッチダウン1　リハーサル2：　10月中旬

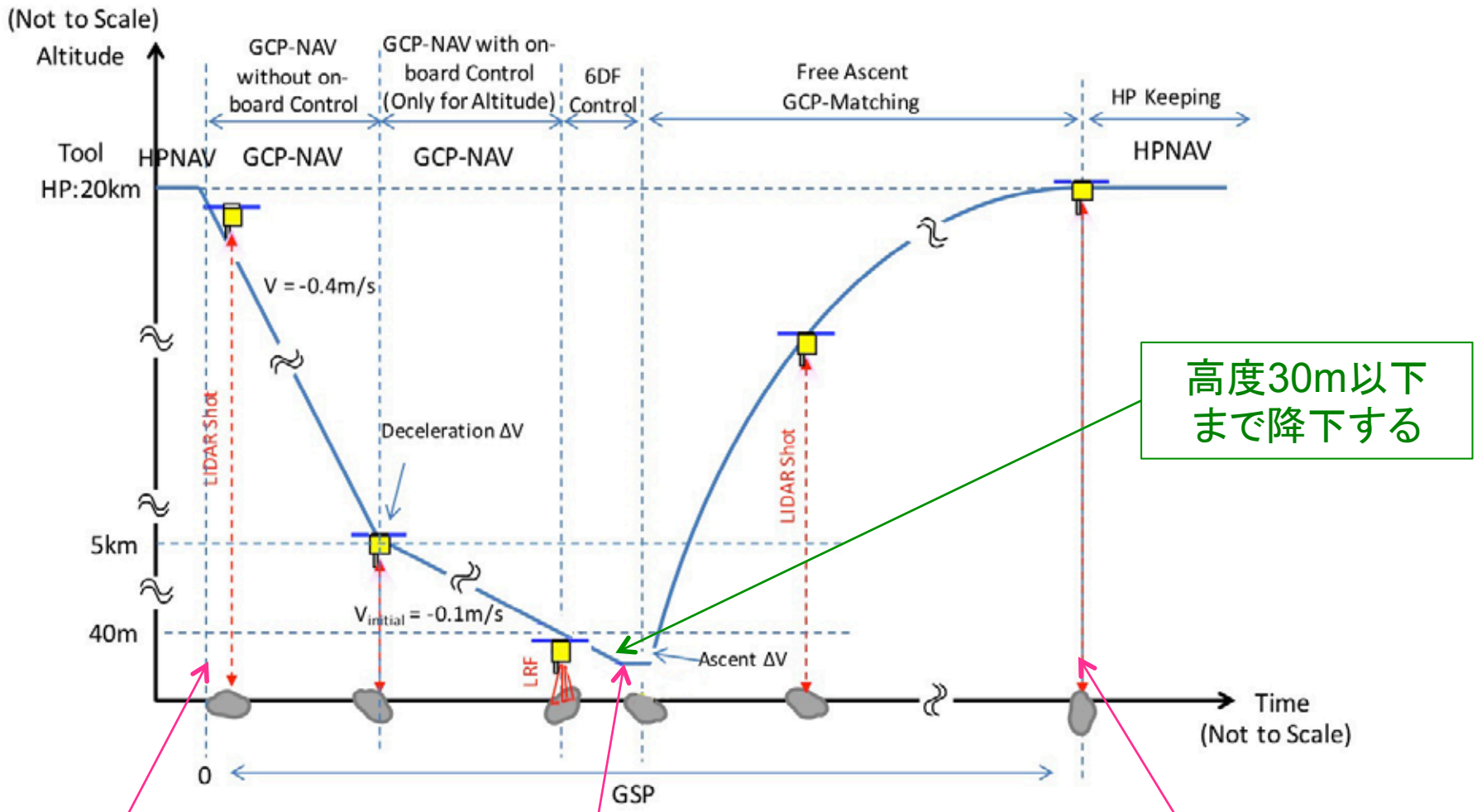
タッチダウン1　：　10月下旬

注意：運用の日は変更になる場合があります。

6. タッチダウン1 リハーサル1

運用概要

新計画に基づき、情報収集含めた着陸試行運用（アボートも戦略の1つ）



降下開始：9月11日16時頃

最下点：9月12日14時頃

HP復帰：9月13日

7. 今後の予定

■記者説明会の予定 （時刻は日本時間）

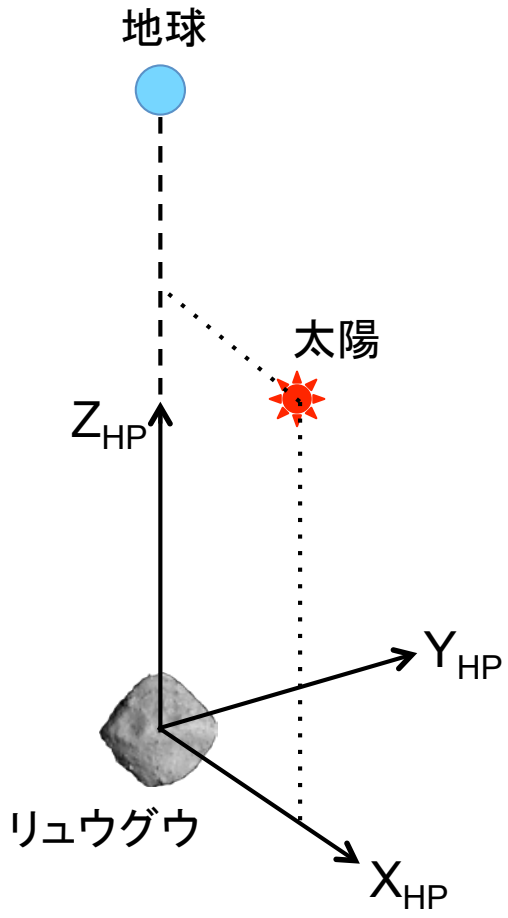
- 9月27日（木） 15:30～16:30
- 10月11日（木）15:30～16:30 (TBD)

■プレスセンタ開設（相模原・宇宙科学探査交流棟）

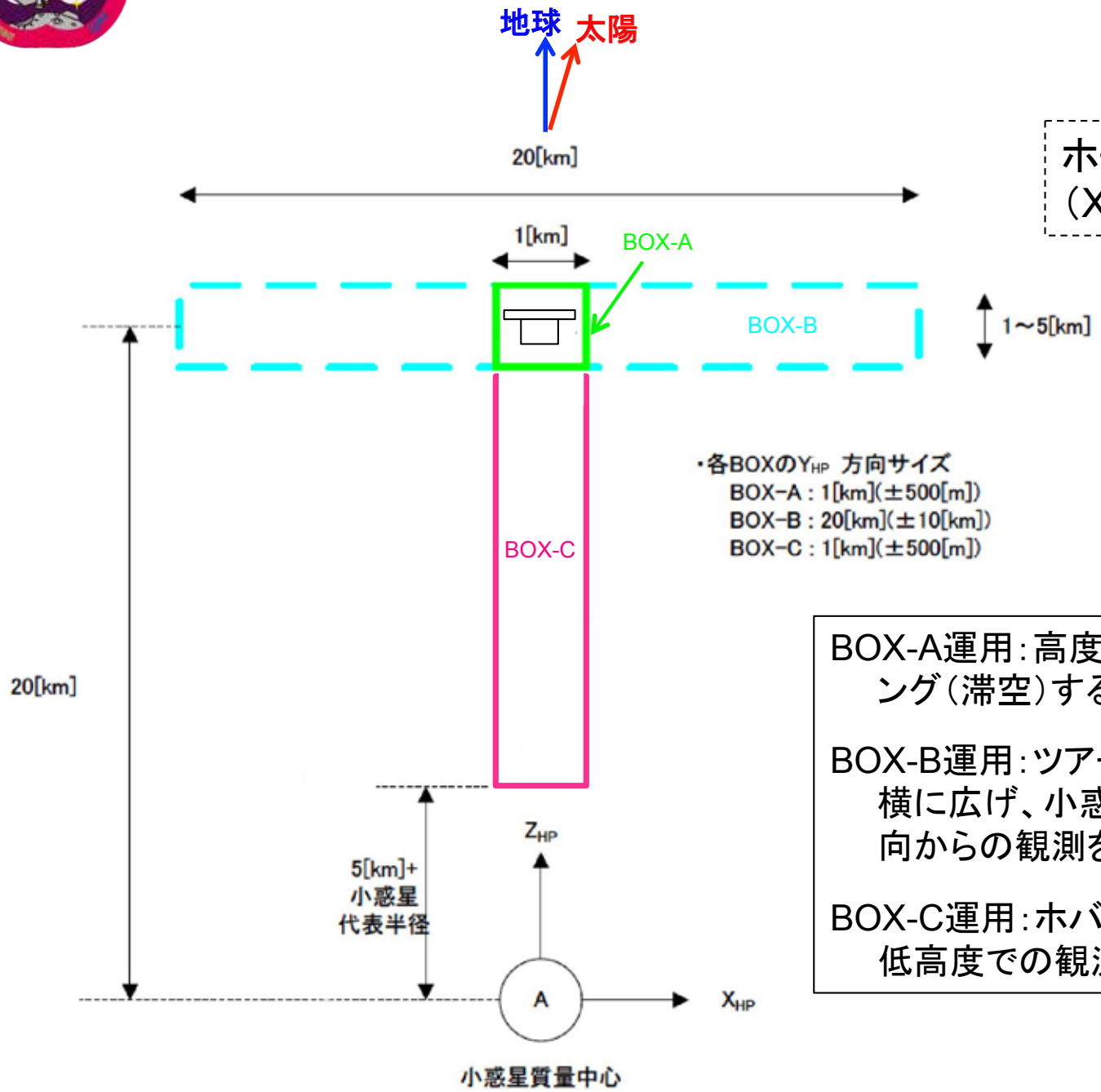
- 9月21日（金） MINERVA-II-1運用
- 10月3日（水） MASCOT運用

参考資料

ホームポジション座標系



BOXの定義



ホームポジション座標系
(X_{HP}, Y_{HP}, Z_{HP})

（参考資料参照）

BOX-A運用：高度20km付近に留まりホバリング（滞空）する運用。定常運用の基本。

BOX-B運用：ツアー観測。ホバリング領域を横に広げ、小惑星正面から少しずれた方向からの観測を行う運用。

BOX-C運用：ホバリング領域を縦に広げ、低高度での観測を可能とする運用。

MINERVA-IIの着地候補地点選定

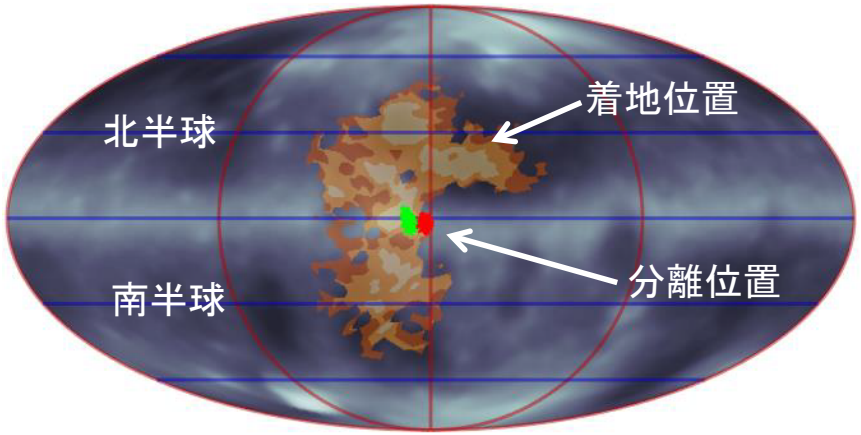
MINERVA-IIの着地点選定の条件：

- □着地する場所がタッチダウン予定地と重ならないこと
- □着地する場所がMASCOTの着地予定地と重ならないこと
- □分離後の探査機高度が30mより低くならないこと
- □地上局との通信が確保できること
- ■「はやぶさ2」探査機との通信が確保できること
- ■温度が高くない領域で、陰となる領域が少ないこと

・赤道付近はリッジ（尾根）となっているため、赤道付近に分離すると着地点が南北に大きく広がってしまう。

・南半球に分離した場合、探査機高度が30mより低くなる可能性がある。

・赤道から北半球側に100m以上離れたところに分離する

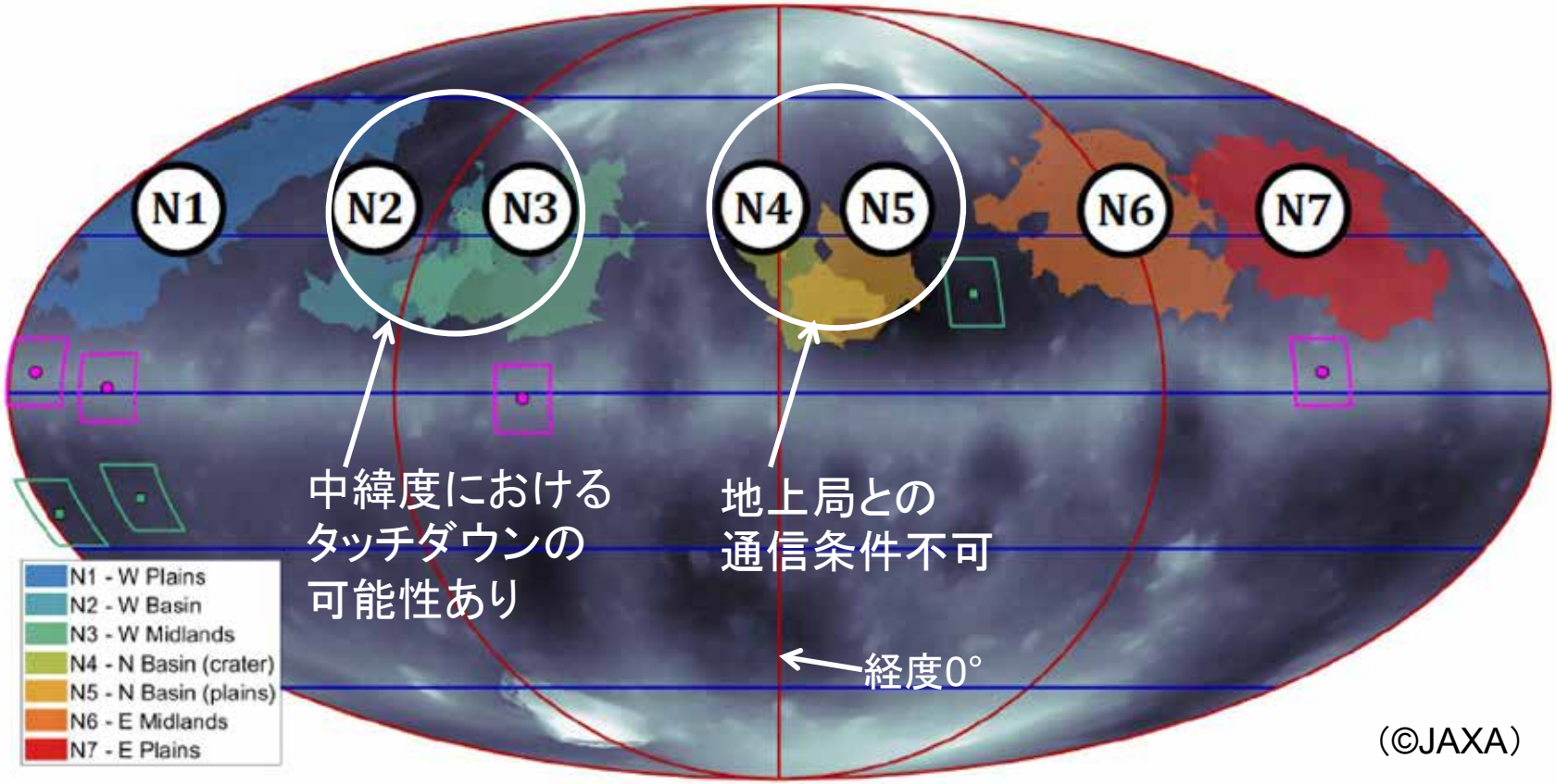


（©JAXA）

赤道付近に分離すると、着地位置が南北に広がってしまう

MINERVA-IIの着地候補地点選定

MINERVA-IIの着地点候補：北半球で検討



（©JAXA）

・タッチダウン・MASCOTの着地点と重ならないことを確認
・ONC-Tによる観測可能性等も考慮

⇒ 候補地：N6 > N1 > N7

着陸実現に向けた戦略

◆当初計画

この段階で着陸が成立する候補が選ばれている

【候補点探索①】
技術的に着陸可能なエリアを複数抽出

→ 【絞り込み①】
科学的に価値の高いエリアを優先順位をつけて2～3選出

→ 【着陸運用①】
優先順位の高い候補点に対しリハーサル降下，着陸を実施

【候補点探索②】 → 【絞り込み②】 → 【着陸運用②】

⋮ 着陸の回数だけ繰り返す

◆新計画

この段階で着陸成立性のさらなる精査が必要

【候補点探索】
相対的に安全そうなエリアを複数抽出

→ 【絞り込み】
科学的に価値の高いエリアを1～3選出

→ 【情報収集】
着陸リハ･着陸機運用を通じて，低高度の情報と降下誘導精度を収集する

→ 【着陸(試行)運用】
着陸を試行する．場合によって途中で中止し，着陸エリアの分析に役立てる

着陸点選定(LSS)会議にて実施

運用習熟

高解像度地表画像

着陸機運用データ

状況によっては，運用知見を踏まえて着陸点選定から再実施する

着陸技術の洗練化，シーケンス改良をしながら繰り返す．