

はやぶさ2トークライブ キックオフ



相模原市立博物館
2016年2月21日

吉川 真 (JAXA)

はやぶさ2トークライブ

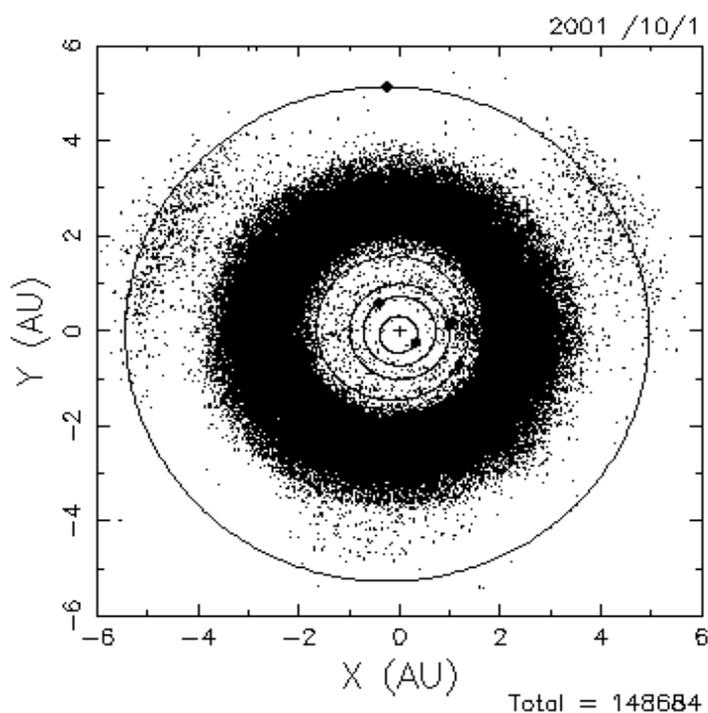
- あかつきトークライブ（全20回）を引き継ぐ。
- あかつきトークライブと同様に、2ヶ月に1回程度の頻度で、「はやぶさ2」が小惑星リュウグウに到着する前くらいまでを目処とするが、可能な範囲で行っていく。
- 内容は、「はやぶさ2」に関連した工学や理学の話題。ただし、より広い範囲で。また、レベルが高い場合もあり（放送大学程度？）。（各担当に任せる）
- 本日はキックオフ。津田プロマネ（海外出張中）に代わって吉川が担当。はやぶさ2プロジェクトの紹介と天体力学。

科学や技術や文化を楽しもう！+できればさらに発展！

本日のテーマ

- 太陽系小天体について
- 「はやぶさ2」の概要と現状
- 天体力学

小惑星の分布と数



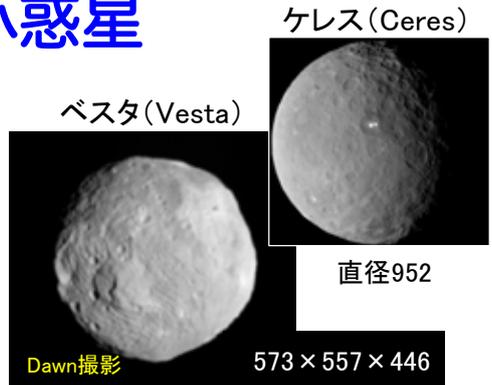
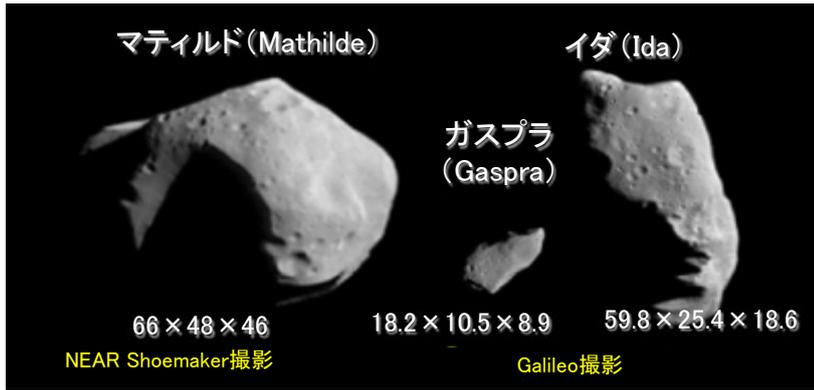
2015年12月の時点で、発見され軌道が求められている小惑星：

約70万個

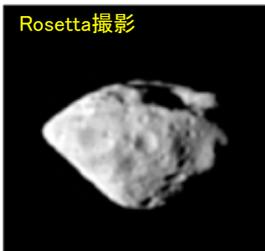
確定番号付き：
約45万個

地球軌道に接近するもの：
約14,000個

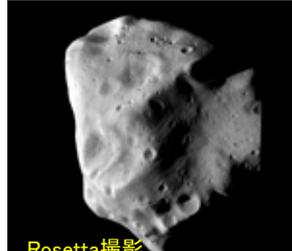
探査機が見た小惑星



シュテインス (Steins)



ルテティア (Lutetia)



トータティス (Toutatis)



エロス (Eros)



イトカワ (Itokawa)



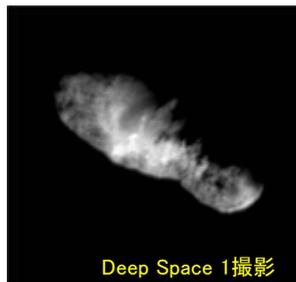
大きさは直径(端から端まで)で、単位はkm。値はトータティス以外は理科年表(平成26年版)による。トータティスの値はJPLのWebより。

探査機が見た彗星

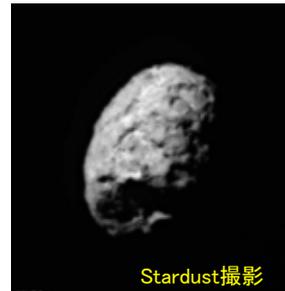
Halley彗星



Borrelly彗星



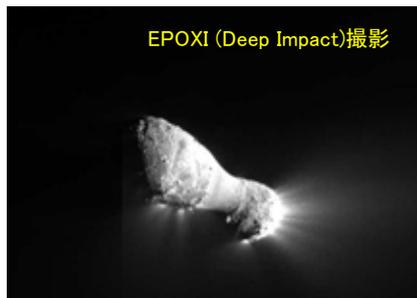
Wild 2彗星



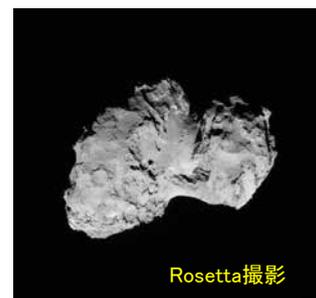
Tempel 1彗星



Hartley 2彗星



Churyumov-Gerasimenko彗星



小惑星イトカワ (Itokawa)

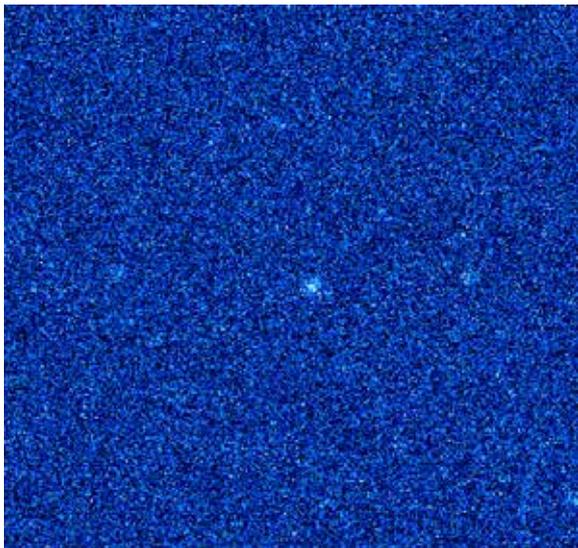


535 × 294 × 209 m

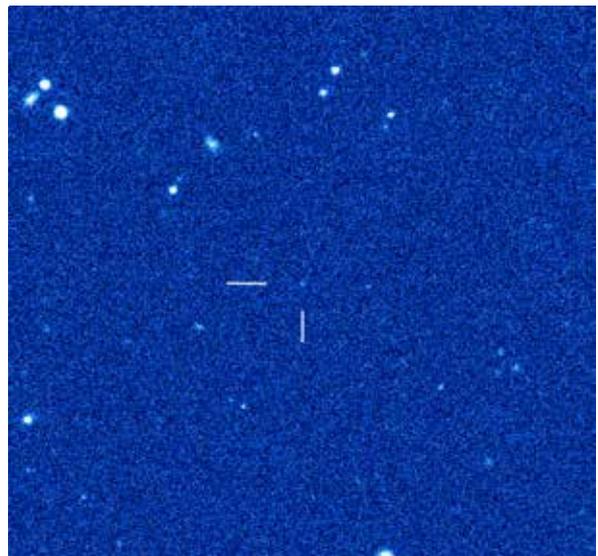
はやぶさ探査機

7

すばる望遠鏡が撮影した小惑星リュウグウ(=1999 JU3)



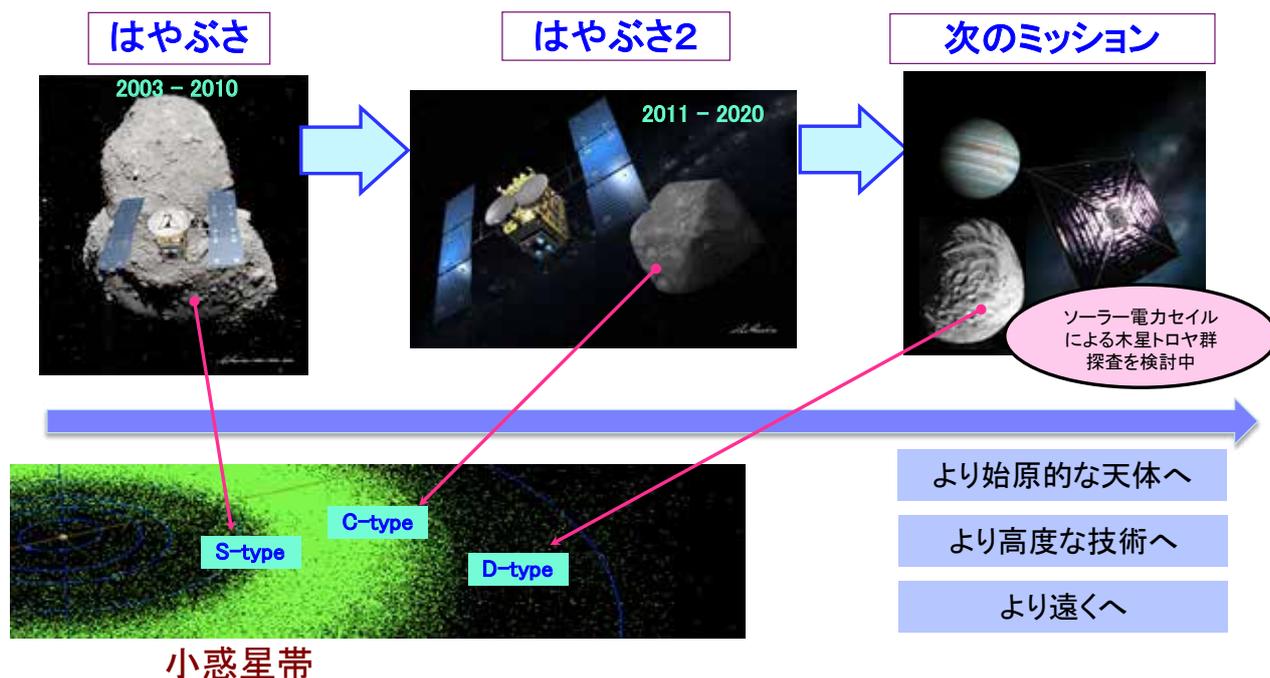
ハワイ現地時間2015年5月20日午前4時21分~24分頃、超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam で1分ごとに連続3回撮影した画像の GIF アニメーション (各30秒露出、視野1分角×1分角)。(クレジット：国立天文台)



ハワイ現地時間2015年5月20日午前4時23分撮影の画像 (30秒露出、視野3分角×3分角)。中心に写っている点が小惑星 (162173) 1999 JU3 で、周囲には銀河や恒星がいくつも写っている。(クレジット：国立天文台)

8

始原天体探査構想



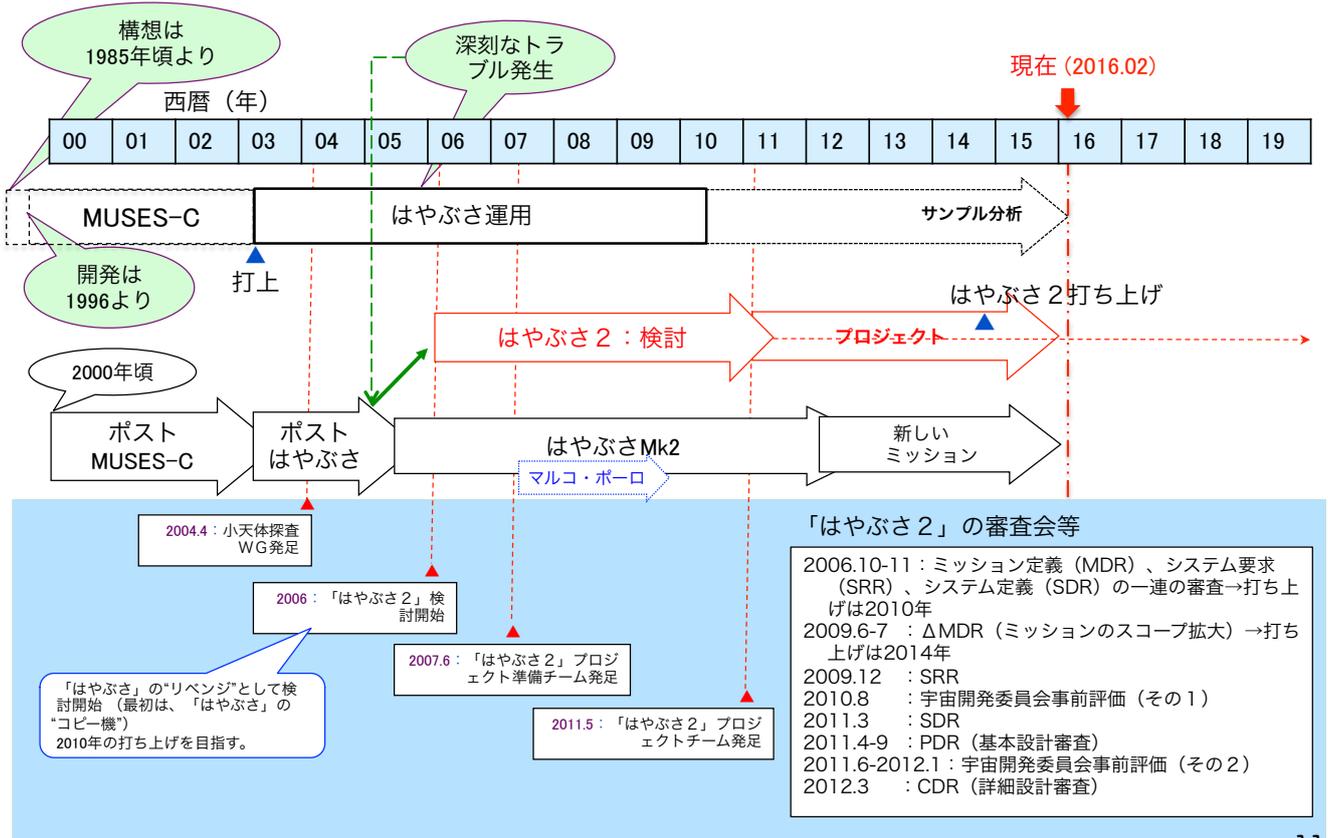
注: はやぶさ2が探査する1999 JU3はC型小惑星であるが、例外的に地球と火星の軌道付近に存在している。

(© JAXA)

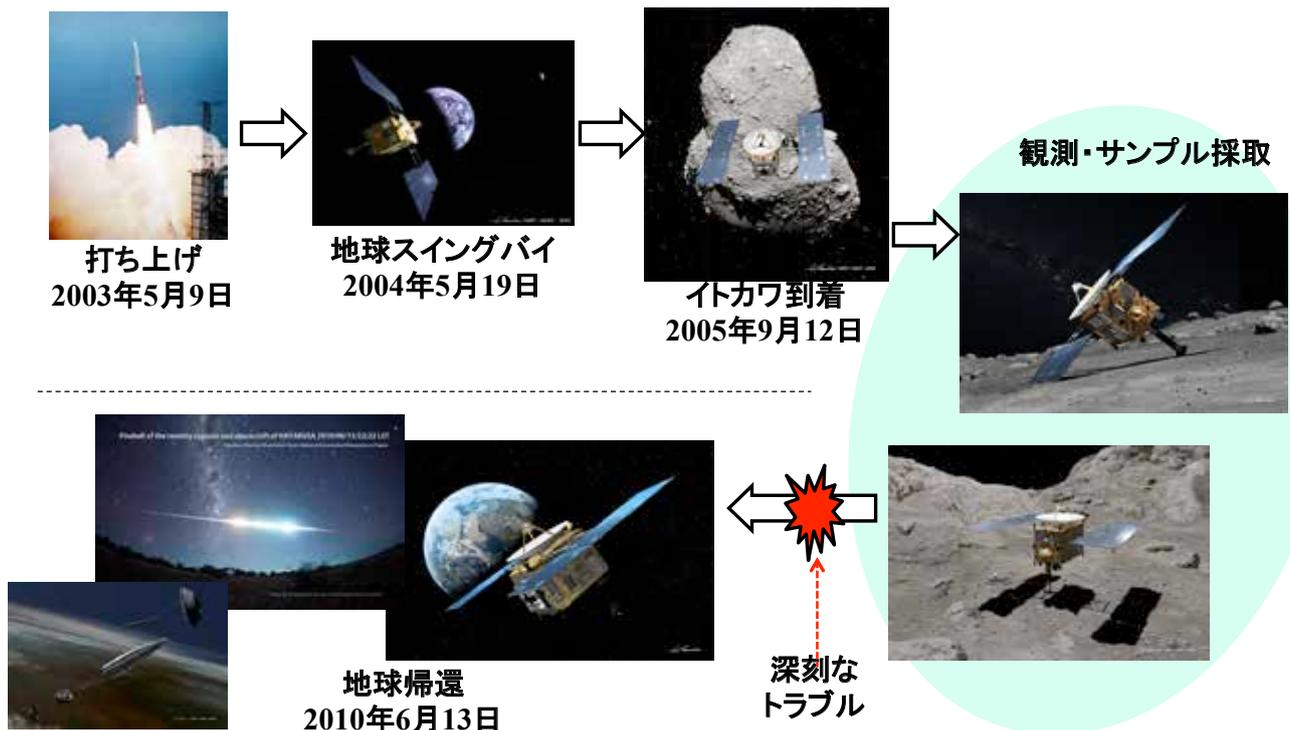
小天体探査の意義



小惑星探査計画の経緯



「はやぶさ」ミッション



「はやぶさ」が教えてくれたこと

もちろん、「技術」や「科学」について、「はやぶさ」は多くのことを教えてくれましたが、それに加えて…

- 世界初に挑戦することのすばらしさ→はやぶさ2でも同じ
 - ・初めて天体を見たときの感動
 - ・困難に打ち勝つ忍耐とチームワークの大切さ
- 世界初に挑戦することの難しさ→はやぶさ2で改善
 - ・想定外の出来事 → いかに事前に予測するかが鍵
 - ・予期せぬトラブル → 信頼性、ロバスト性の向上が重要
- 現代における“真”の冒険の重要性→はやぶさ2へ
 - ・若い世代へ (orすべての世代へ) 夢を
 - ・科学と技術へ強い関心を持ってもらうために

13

「はやぶさ2」ミッションの意義

1. 科学的意義

「我々はどこから来たか」－ 太陽系の起源と進化、生命の原材料の探求

地球、海、生命の原材料物質は、惑星が生まれる前の原始太陽系星雲の中に存在していたが、太陽系初期には同じ母天体の中で、互いに密接な関係を持っていた。この相互作用を現在でも保っている始原天体（C型小惑星）からのサンプルを分析することで、太陽系の起源・進化の解明や生命の原材料物質を調べる。

2. 技術的意義

「技術で世界をリードする」－日本独自の深宇宙探査技術の継承と発展

「はやぶさ」は世界初の小惑星サンプルリターンとして、数々の新しい技術に挑戦したミッションであった。その経験を継承し、より確実に深宇宙探査を行える技術を確認する。さらに、新たな技術にも挑戦し、今後の新たな可能性を開く。

3. 探査としての意義

「フロンティアへの挑戦」－科学技術イノベーション、産業・社会への波及、国際プレゼンス発揮、青少年育成等の効果

未踏の地に踏み込むことで、新しい科学技術を創造し、産業に貢献するとともに、スペースガード、資源利用、有人探査のターゲット等の科学以外の観点から小天体に対応することで社会に貢献する。

14

小惑星サンプルリターンの科学



太陽系の過去について

■太陽系の誕生と進化を解明する

- ・どのような物質がどのような状態で存在していたのか?
- ・惑星はどのようにして誕生し進化したのか?
- ・生命の原材料 (有機物・水) は何か?

太陽系の現在について

■隕石のキャリブレーション (校正) をする

- ・隕石と小惑星サンプルはどのような関係になっているか?
- ※膨大な数の隕石が収集されているが、これらは地球の大気や水等で汚染されているため、宇宙にあったときの状況を推定することが困難である。小惑星サンプルと比較することにより、隕石を貴重な試料に変えることができる。

「はやぶさ2」のミッション

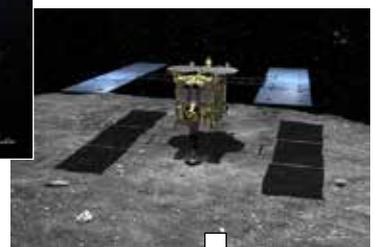
2014年12月3日
打ち上げ



2018年6-7月
小惑星到着



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。



地球帰還
2020年11-12月



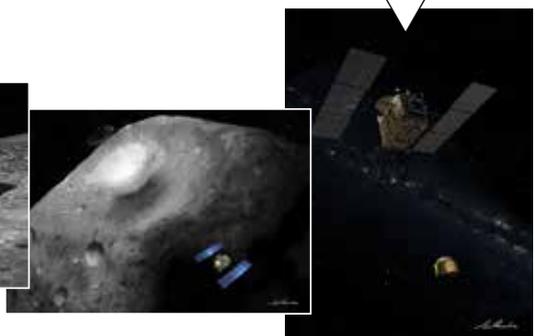
サンプル分析

(イラスト 池下章裕氏)

小惑星出発
2019年11-12月

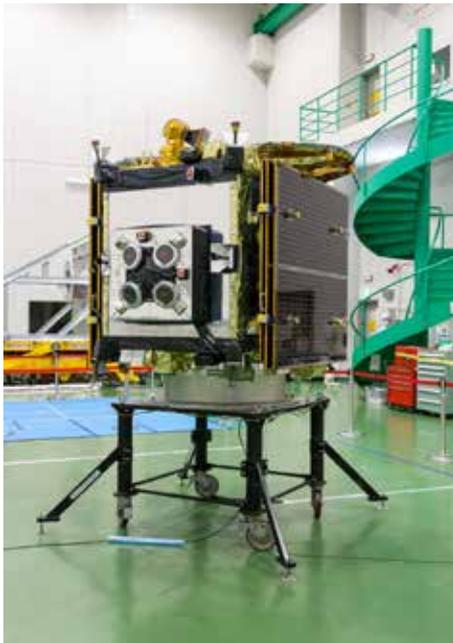


安全を確認後、クレータにタッチダウンを行い、地下物質を採取する。



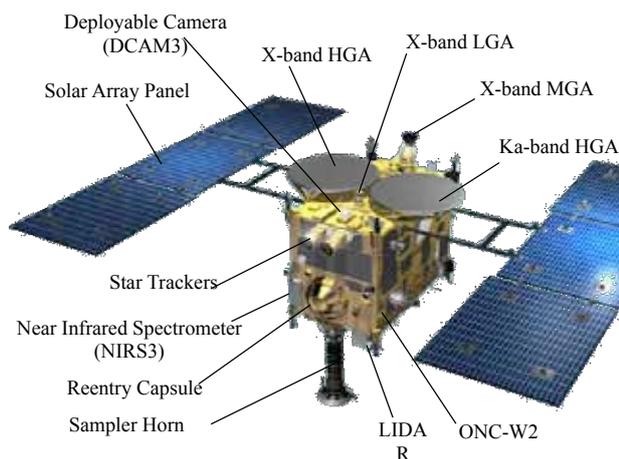
衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレータを作る。

「はやぶさ2」 フライトモデル



2014年8月31日：JAXA相模原キャンパス

はやぶさ2 探査機



科学観測機器

小型着陸機・ローバ

MASCOT



by DLR and CNES

MINERVA-II



II-1 : by JAXA MINERVA-II Team
II-2 : by Tohoku Univ. & MINERVA-II consortium



サイズ : 1m×1.6m×1.25m (body)
質量 : 600kg (Wet)

「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較 (1)

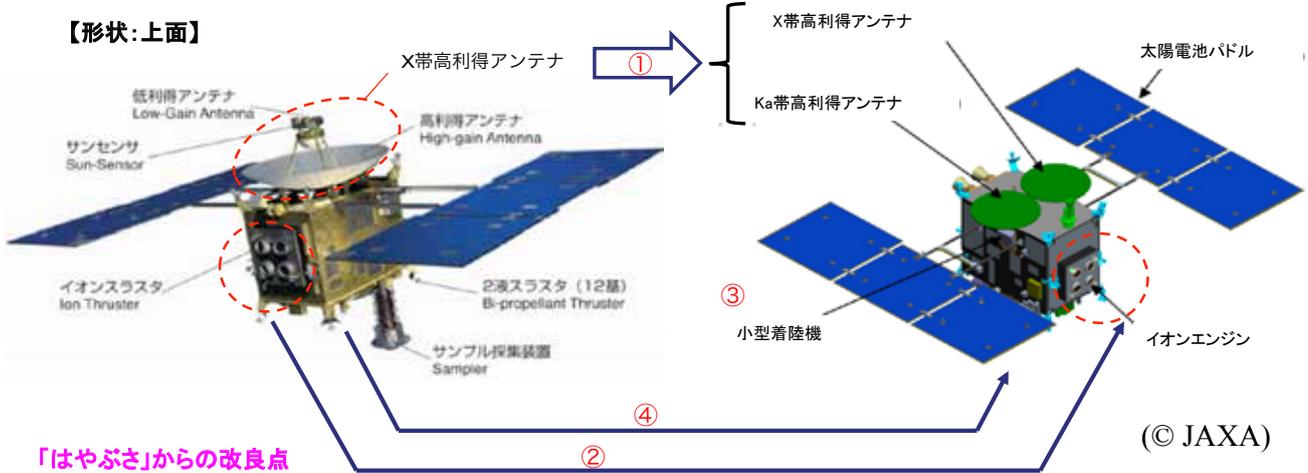
はやぶさ

はやぶさ2

大きさ: 約1m × 1.6m × 1.1m (探査機本体)
重さ: 510kg (燃料込み)

大きさ: 約1m × 1.6m × 1.25m (探査機本体)
重さ: 約600kg (燃料込み)

【形状: 上面】



「はやぶさ」からの改良点

- ① 通信系: 高速通信のために、新規にKaバンド通信系を追加した。高利得アンテナを平面アンテナにした。
- ② イオンエンジン: 耐久性を増し、推力を増強した。
- ③ 小型着陸機 (MASCOT: Mobile Asteroid Surface Scout): ドイツ・フランスが開発した小型の着陸機で、小惑星に着陸してデータを取得する。
- ④ 姿勢制御装置 (リアクションホイール): 「はやぶさ」で3台中2台が故障したので、「はやぶさ2」では4台搭載したり、運用を工夫したりしてトラブルが起こらないようにする。

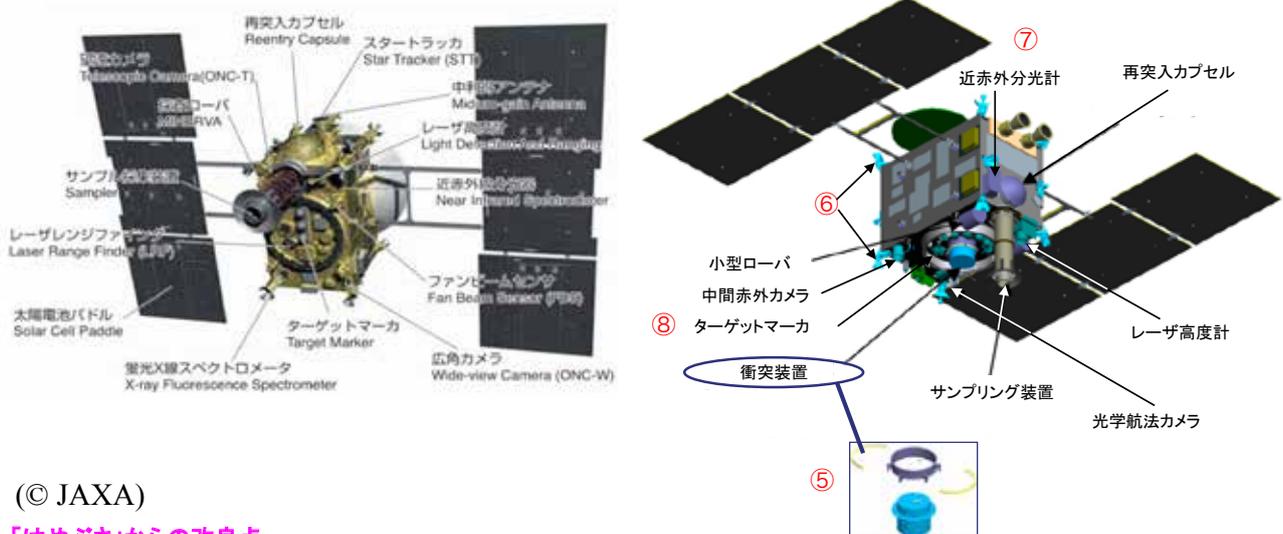
19

「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較 (2)

はやぶさ

はやぶさ2

【形状: 下面】



(© JAXA)

「はやぶさ」からの改良点

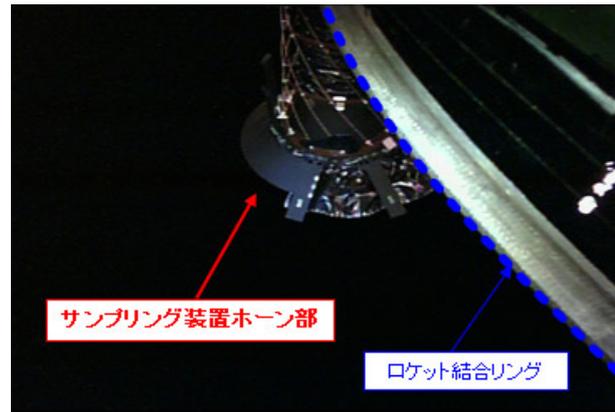
- ⑤ 衝突装置: 新規の装置で、小惑星表面に人工的なクレーターを作る。その後、地下の物質の採取を試みる。
- ⑥ 化学推進系: 「はやぶさ」および「あかつき」の不具合の対策として、推葉の配管系統を改良した。
- ⑦ ミッション機器: C型小惑星探査に対応するような改良や新規の機器を搭載した。
- ⑧ ターゲットマーカ: ピンポイントタッチダウンのために、「はやぶさ」の3つから5つに増やした。

20

クリティカル運用

- 太陽電池パネルの展開、太陽捕捉制御
- サンプリング装置ホーン部の伸展
- イオンエンジンの方向を制御するジンバルの打上時保持機構（ロンチロック）解除
- 探査機の3軸姿勢制御機能
- 地上の精密軌道決定システムの機能確認

2014年12月5日
クリティカル運用終了



21

初期機能確認 実施項目

日付	実施項目一覧表
2014	12/7,8 Xバンド中利得アンテナビームパターン測定、実通データ取得、X帯通信機器の機能確認
	12/9 電源系（バッテリー）機能確認
	12/10 近赤外分光計（NIRS3）点検
	12/11 中間赤外カメラ（TIR）/分離カメラ（DCAM3）/光学航法カメラ（ONG）点検
	12/12-15 姿勢軌道制御系（各機器）機能確認
	12/16 小型ローバ（MINERVA-II）/小型着陸機（MASOT）点検
	12/17 再突入力プセル/衝突装置（SCI）点検
	12/18 Xバンド高利得アンテナ（XHGA）5点法ポインティング試験、イオンエンジン稼働前処置
	12/19-22 イオンエンジン ベーキング
	12/23-26 イオンエンジン試運転（点火） ※1台ずつ実施 〈23日/イオンエンジンA〉、〈24日/同B〉、〈25日/同C〉、〈26日/同D〉
12/27-1/4 精密軌道決定、DDOR(Delta Differential One-way Range)実施	
2015	*12/28、1/1,2は運用休み
	1/5-7 Ka帯通信機器・実通データ取得、アンテナパターン測定
	1/9-10 Ka帯 DSN各局によるDOR、レンジング試験
	1/11 イオンエンジン稼働前処置
	1/12-15 イオンエンジン 2台組合せ試運転〈12日/A+C〉、〈13日/C+D〉、〈14日/A+D〉、〈15日/A+C〉
	1/16 イオンエンジン 3台組合せ運転 〈A+C+D〉
	1/19-20 イオンエンジン 2台組合せ・24時間連続自律運転〈A+D〉
	1/23 レーザ高度計（LIDAR）、レーザレンジファインダ（LRF）、フラッシュランプ（FLA） 機能確認
	1/20-3/2 巡航フェーズ（定常運用）移行に向けた複数機器の連係動作等の機能確認 太陽光圧影響評価、太陽追尾運動挙動データ取得、太陽光圧及び姿勢軌道制御系機器（リアクションホイール他）、イオンエンジンなどの連係動作機能確認

22

巡航フェーズへ移行

■2015年3月2日

- ・初期機能確認終了
- ・3月3日より巡航フェーズへ

■イオンエンジンの連続運転

- ・1回目：3月3日～21日 409時間
- ・2回目：6月2日～6日 102時間



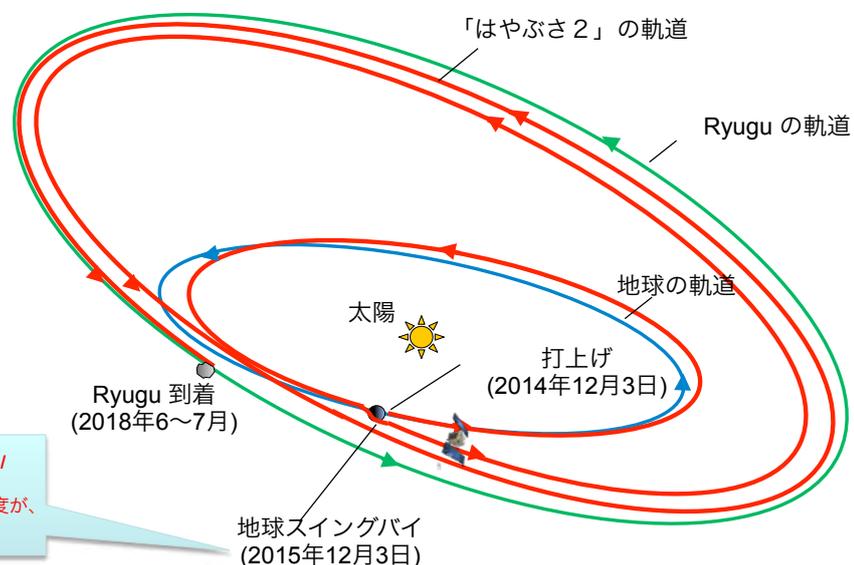
地球スイングバイは2015年12月3日

23

「はやぶさ2」地球スイングバイ

- ・2015年12月3日、「はやぶさ2」が地球に接近し、スイングバイを行った。
- ・地球最接近時刻：19時8分（日本時間）
- ・ハワイ諸島上空約3090kmを通過

軌道の概念図

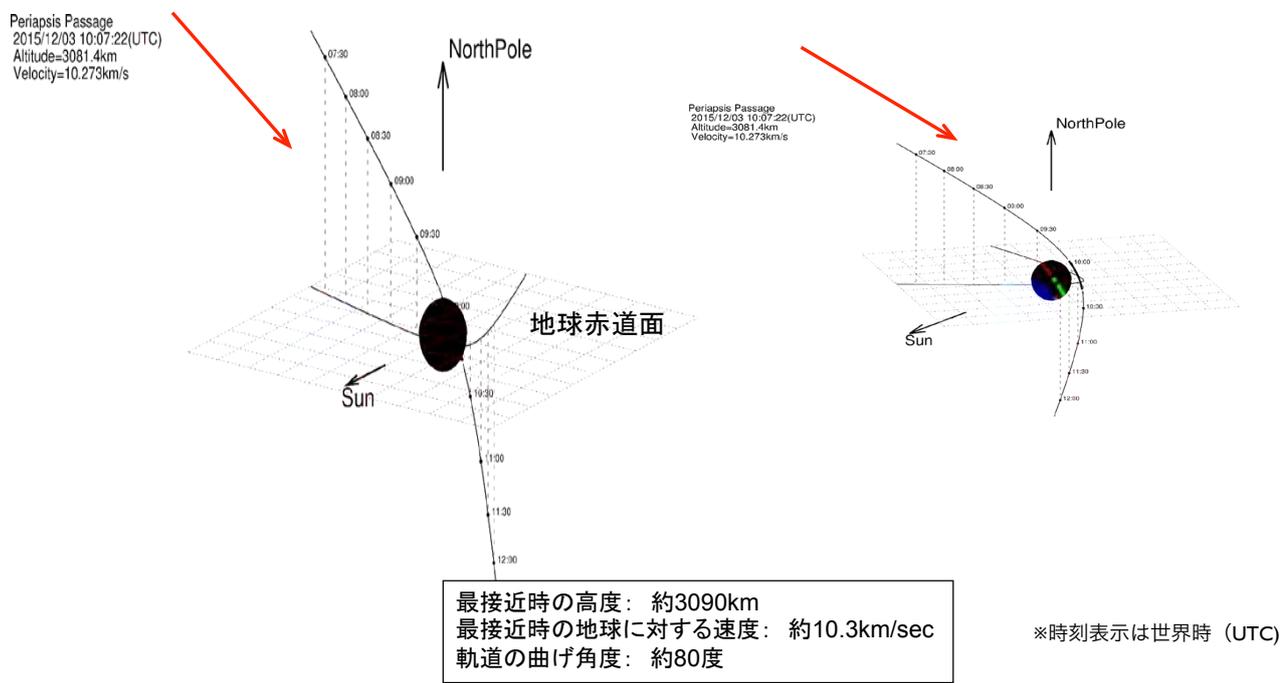


スイングバイにより、飛行速度を**1.6km/sec**増速する
(スイングバイ時に、太陽に対する速度が、**30.3km/s**から**31.9km/s**になる)

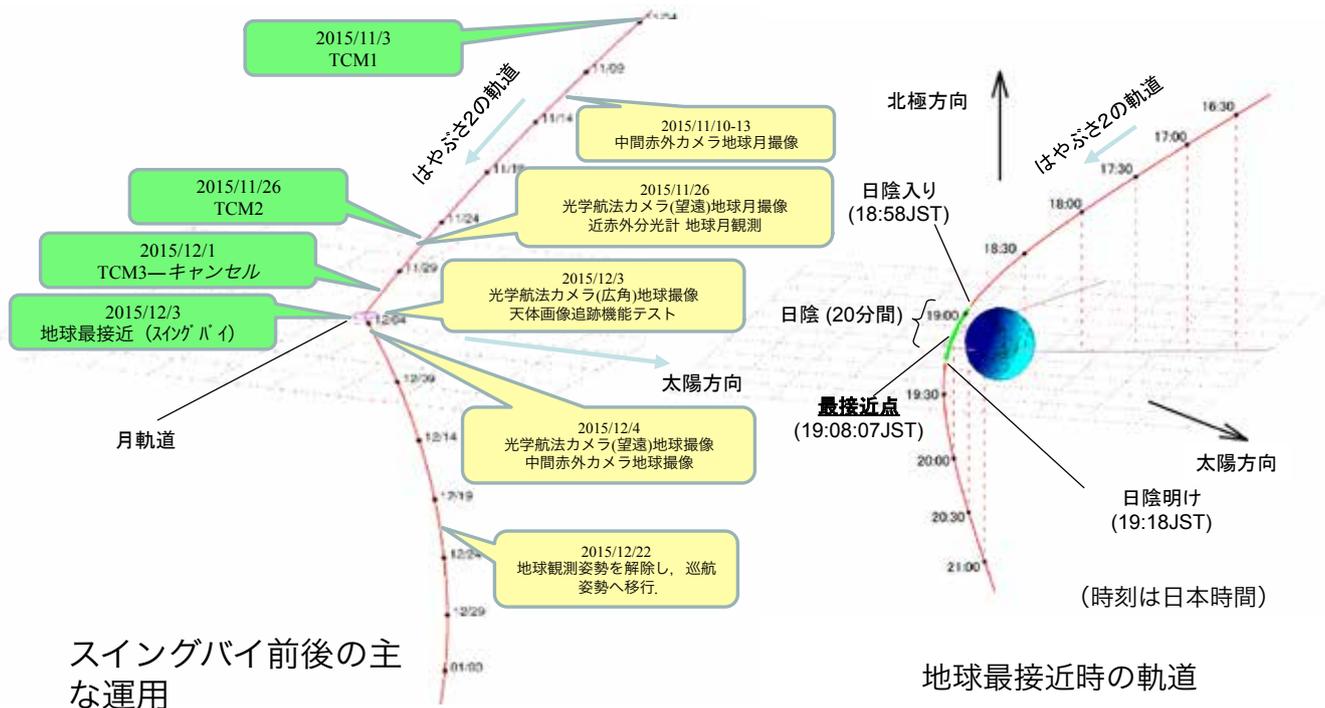
24

スイングバイの軌道

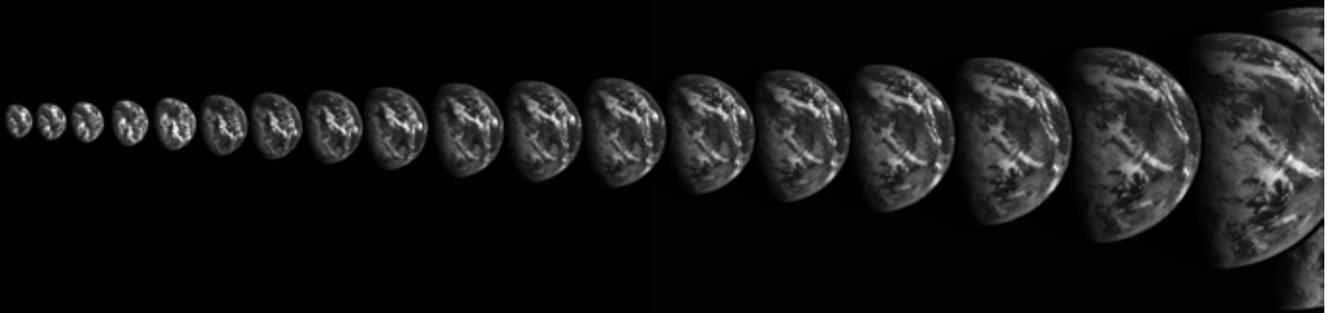
地球を中心として眺めた図



スイングバイ前後の運用



ONC-W2が撮影した地球



2015年12月3日、スイングバイ直前に「はやぶさ2」のONC-W2によって撮影された地球の画像。図1のアニメーションにある画像を並べたもの。

27

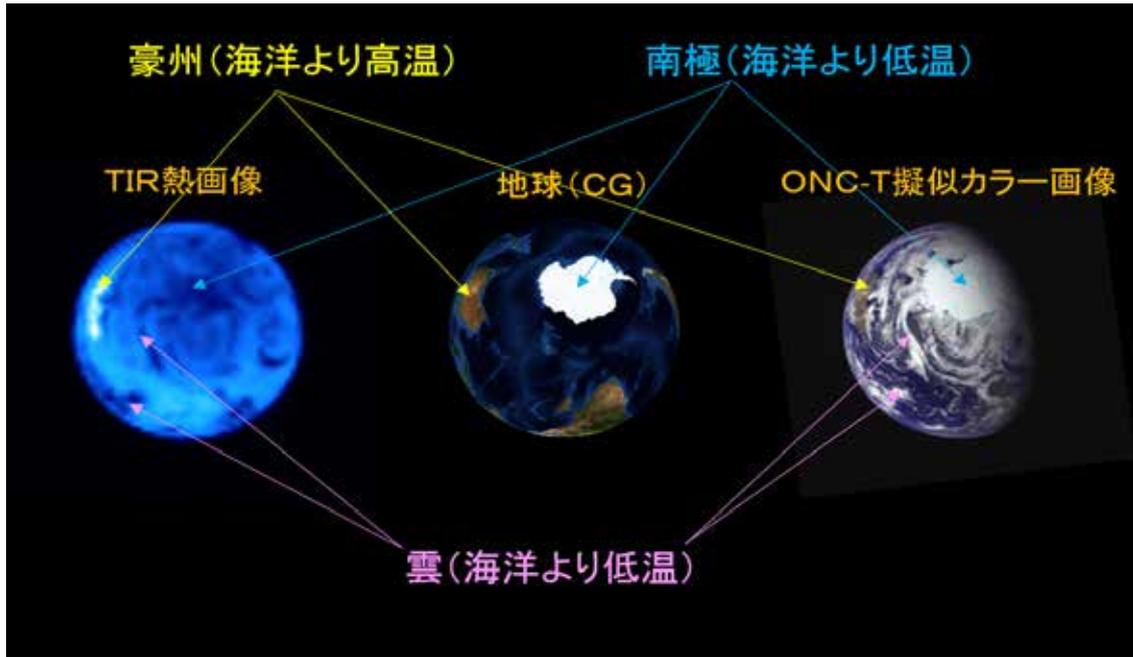
ONC-Tの撮影

- ONC-T：光学航法望遠カメラ
- 地球をいろいろなフィルターを通して撮影
- 3色を使って、カラー合成
- 2015年12月4日、13時 9分（日本時間）。約34万km。



28

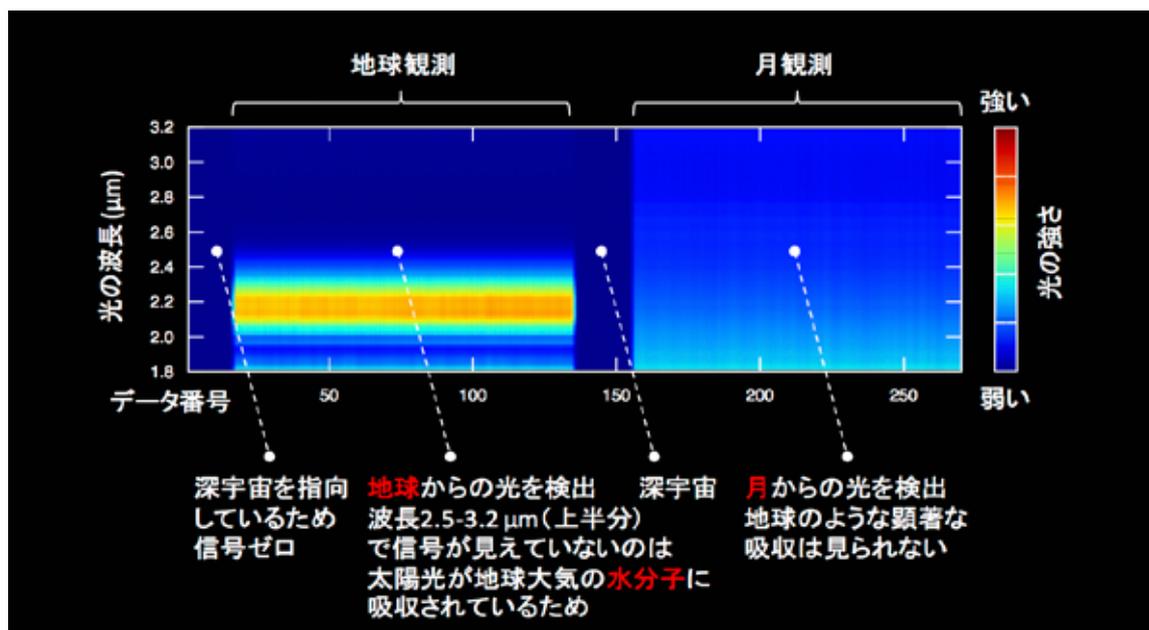
TIRの撮影



中間赤外カメラ (TIR) による地球の熱放射画像 (左)、「はやぶさ2」からみた同時刻の地球のCG画像 (中央)、直後に撮像した光学航法望遠カメラ (ONC-T) による地球の擬似カラー画像 (右)

29

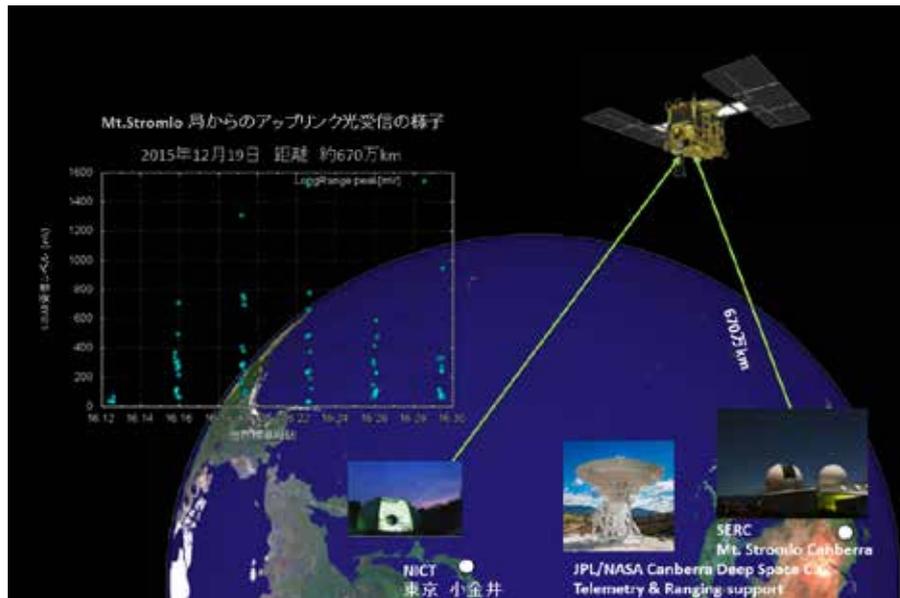
NIRS3の撮影



2015年11月26日にNIRS3が取得した地球と月のスペクトルデータの一部

30

LIDARによる光リンク実験

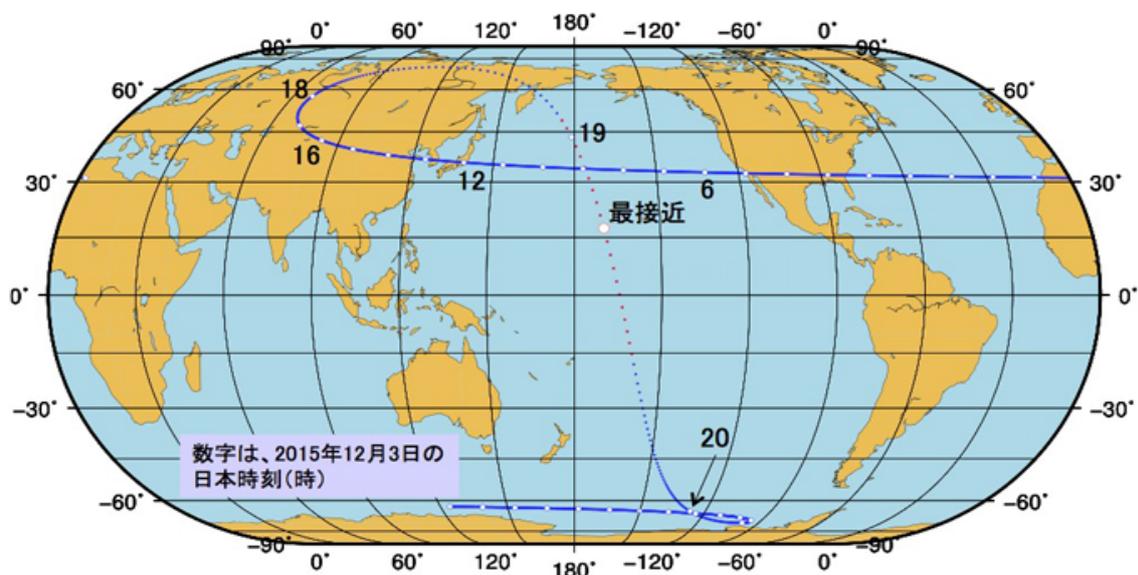


レーザー高度計(LIDAR)と地上の衛星レーザー測距局との間で、レーザー光を使った光リンク実験を行った。スイングバイ後にはオーストラリア・キャンベラ近郊にある豪州宇宙環境研究センターのMt. Stromlo局からLIDARに向けてレーザー送信を試み、その結果、地球から距離670万kmのところまでLIDARはレーザー光を受信し、1way (片道) の光リンクを確立することができた。

31

スイングバイの軌道

探査機直下点の軌跡



- 最接近時刻: 2015年12月3日10時8分7秒(UTC)、日本時間同日19時8分7秒
- 2015年12月2日 12時00分 から2015年12月4日 0時00分までを1分刻みでプロット

32

スイングバイ時の「はやぶさ2」を地上の望遠鏡から観測するキャンペーン

- 「はやぶさ2」が地球に接近するとき、日本から観測できる。
- 時間帯は、12月3日の日没から19時前くらいまで
- 日本公開天文台協会（JAPOS）と日本惑星協会（TPSJ）が観測キャンペーンを呼びかける。
- 80以上の個人・チームが観測に挑戦し、36地点で観測に成功！



33

今後の予定

- Ryugu到着までに、太陽の周りを2周半飛行する(飛行距離22億km相当)。
- 2016年3~4月頃に、イオンエンジン運転(動力航行)を開始する。Ryugu到着までに、約7000時間、イオンエンジンを稼働する予定である。
- 2016年4月下旬に南半球局運用から日本局運用に移る。
- 2016年夏は地上望遠鏡によるRyugu観測好機となる(到着前最後の観測好機)。

ミッションの予定



※イオンエンジン運転予定は、変更の可能性があります。

34

科学：太陽系の誕生と進化を解明する

テーマ



(背景の図はNewton Pressより)

①惑星を作った物質を調べる

原始太陽系円盤にはどのような物質があり、惑星が誕生するまでにどのように変化したのか？

②惑星への成長過程を調べる

微惑星から惑星へ、天体はどのようにして成長していったのか？

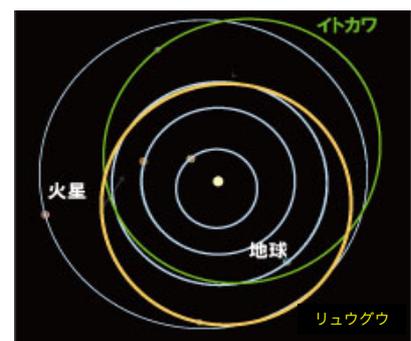
35

探査対象小惑星の特徴

2015年11月の時点での情報

名称	: Ryugu (リュウグウ)
確定番号	: 162173
仮符号	: 1999 JU3
	: 1999年5月に発見された小惑星
大きさ	: 約900 m
形	: ほぼ球形
自転周期	: 約7時間38分
自転軸の向き	: 正確な推定が困難
反射率	: 0.05 (反射率が1に比べて小さい=黒っぽい)
タイプ	: C型(水・有機物を含む物質があると推定される)
軌道半径	: 約1億8千万km
公転周期	: 約1.3年
密度・質量	: 現時点では不明であるが、0.5-4.0g/cm ³ の密度を仮定している。 質量は 1.7×10^{11} kg~ 1.4×10^{12} kg程度。

小惑星Ryuguの軌道



(© JAXA)

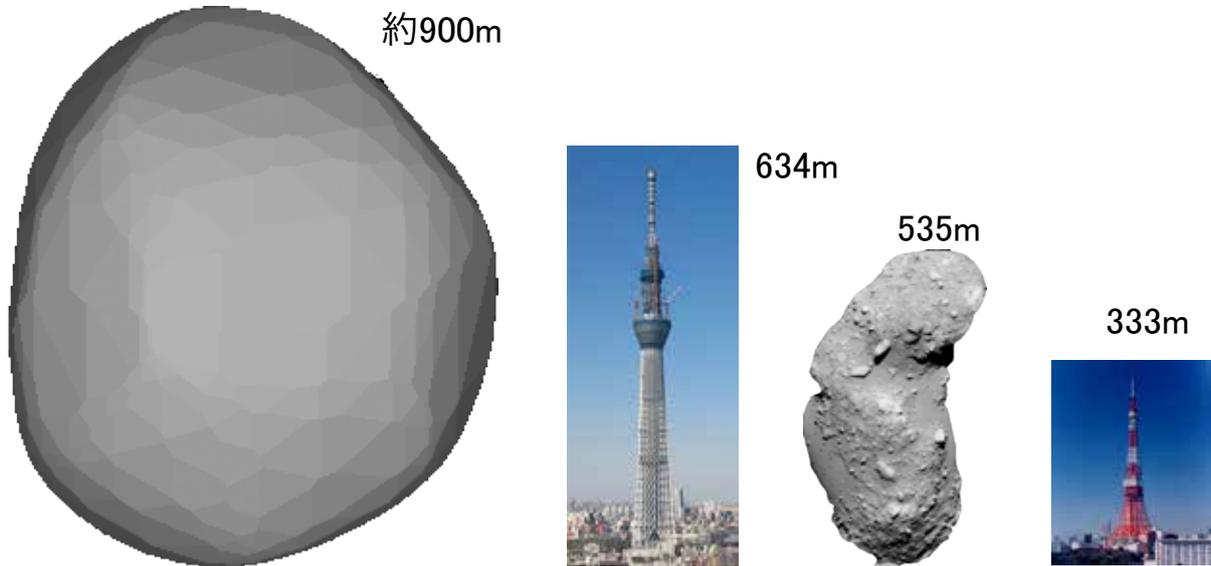
推定された形状



(T. Mueller氏による推定形状を会津大が可視化したもの)

36

イトカワとリュウグウの大きさ



37

はやぶさ 2 が目指す小惑星の名称

- 目的地：小惑星1999 JU3 ←仮符号
- 名称：Ryugu（リュウグウ）

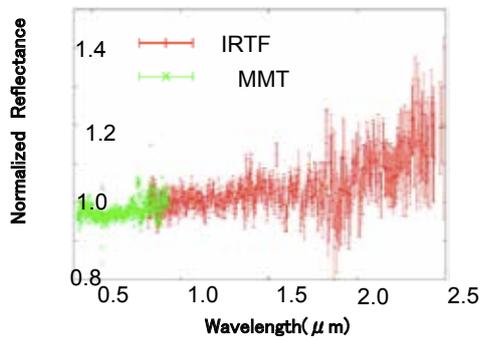
理由

- 「浦島太郎」の物語で、浦島太郎が玉手箱を持ち帰るということが、「はやぶさ 2」が小惑星のサンプルが入ったカプセルを持ち帰ることと重なること。
- 小惑星1999 JU3は水を含む岩石があると期待されており、水を想起させる名称案であること。
- 既存の小惑星の名称に類似するものが無く、神話由来の名称案の中で多くの提案があった名称であること。
- Ryugu」は「神話由来の名称が望ましい」とする国際天文学連合の定めたルールに合致し、また、第三者商標権等の観点でも大きな懸念はないと判断したため。

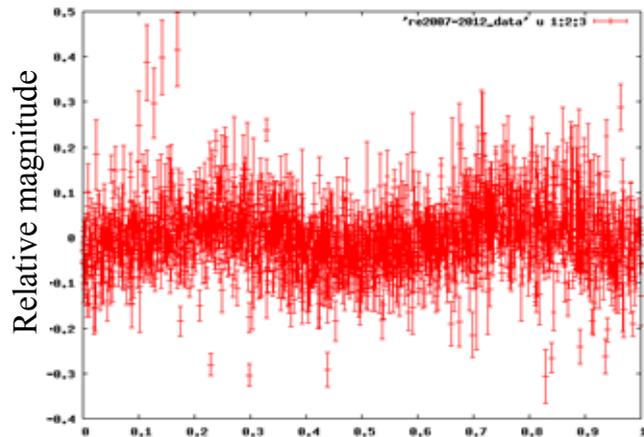
38

(162173) Ryuguの観測データ

スペクトル



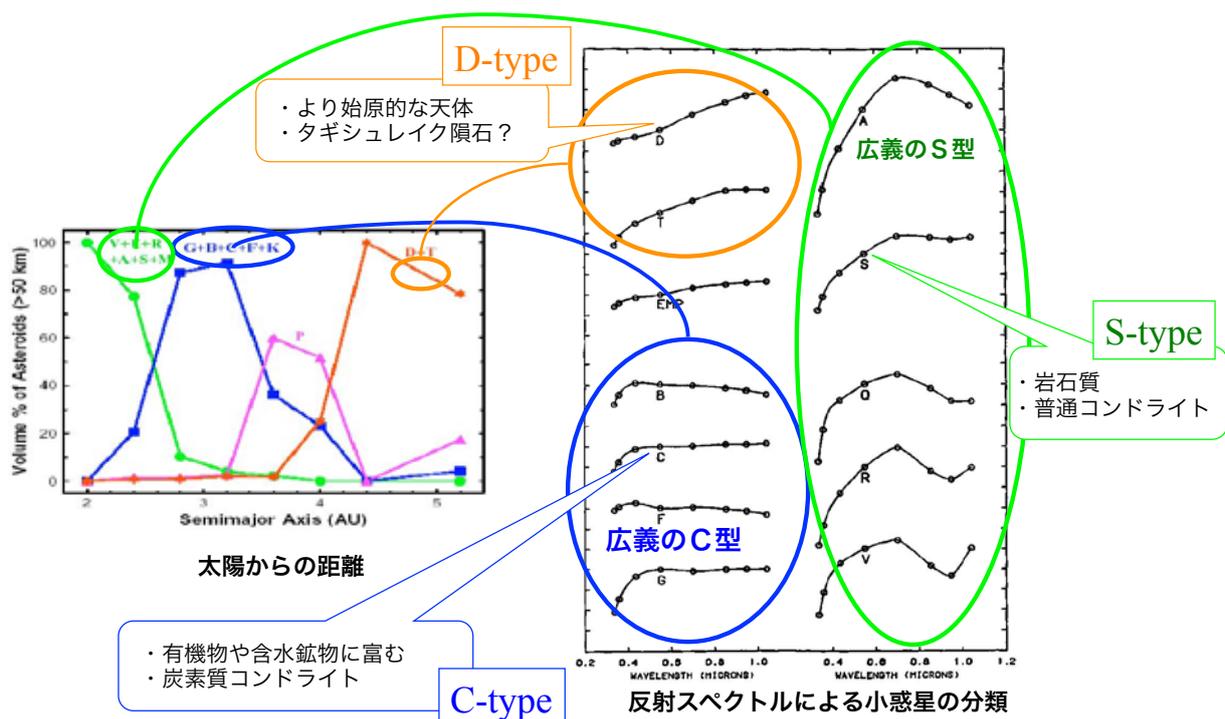
ライトカーブ(変光曲線)



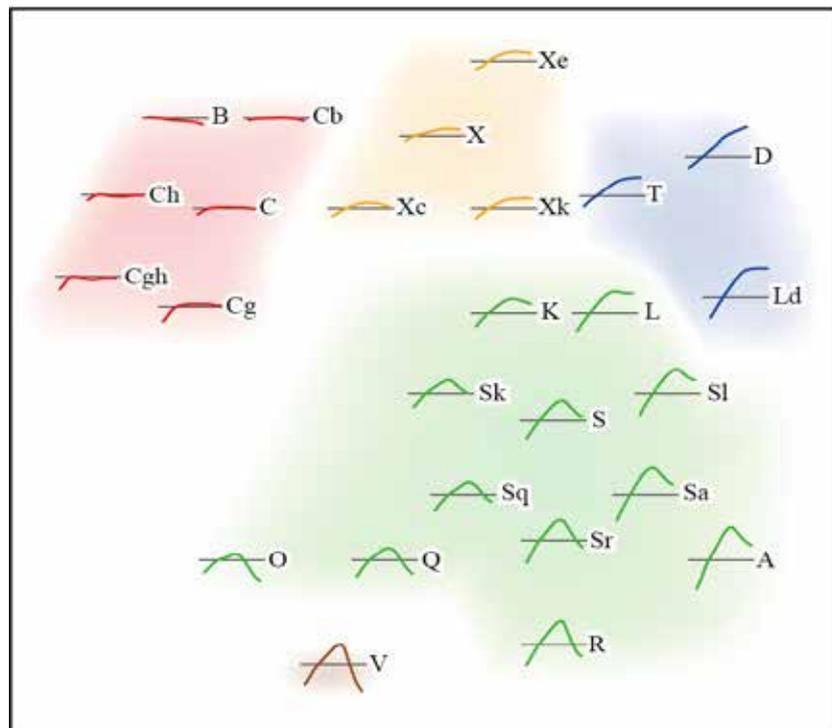
Rotational phase

2007~2012のデータを7.628時間周期で折り返して表示したもの

参考：小惑星の分類



参考：小惑星の分類



(Bus & Binzel 2002)

「はやぶさ2」国際協力全体像

米国



1. 米国航空宇宙局 (NASA)

- JPLによる追跡・管制支援
- 小惑星地上観測支援
- OSIRIS-RExのサンプル提供 等



JAXAはミッション運用への参加機会とサンプルを提供。

欧州



1. ドイツ航空宇宙センター(DLR)

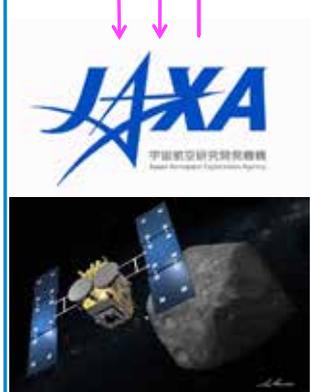
- 追跡支援
- 微小重力実験支援



2. フランス宇宙研究センター (CNES)

- MASCOT搭載科学機器の開発

JAXAは小型ランダ (MASCOT) を搭載、小惑星に投下。



豪州



1. 豪州産業省 (DOI)

- 豪州への着陸許可の発行

2. 豪州国防省 (DOD)

- 着陸場所の有償利用

JAXAは利用代金を支弁。

はやぶさ2サイエンスチーム HJST (Hayabusa2 Joint Science Team)

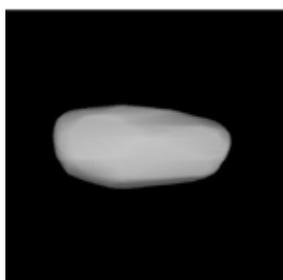


第1回HJST会議：2012年11月26-27日 JAXA相模原キャンパス
第2回HJST会議：2013年 9月19-20日 JAXA相模原キャンパス
第3回HJST会議：2014年 3月18日 USA Texas (LPSC会場)
第4回HJST会議：2015年 2月23-24日 JAXA相模原キャンパス
第5回HJST会議：2015年12月10-11日 JAXA相模原キャンパス

43

新たなる発見へ

■ 「はやぶさ」の発見



微小NEO (地球接近小惑星) の概念が変わった!

■ 「はやぶさ2」は?



44

天体力学

天体力学については、
時間がなくなってしまう
ので省略しました

45

天体力学とは

対象とするもの

このページから始める
予定でしたが、また機
会があるときに...

- ・ 天然の天体：太陽系天体、連星、星団、銀河、銀河団

少数多体系

多体系

⇒軌道進化

- ・ 人工天体　：ロケット、人工衛星、宇宙探査機

⇒軌道制御

- ・ 数学　　：三体問題、力学系、カオス、など

⇒数学的理解

46