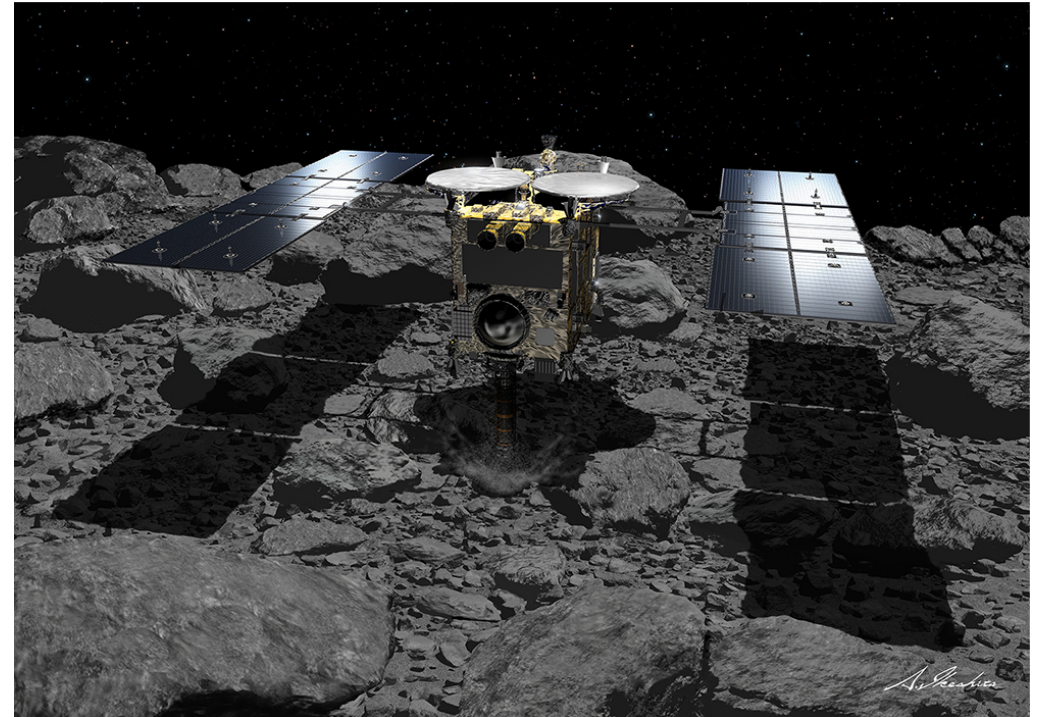


NICT 第14回宇宙天気ユーザーズフォーラム

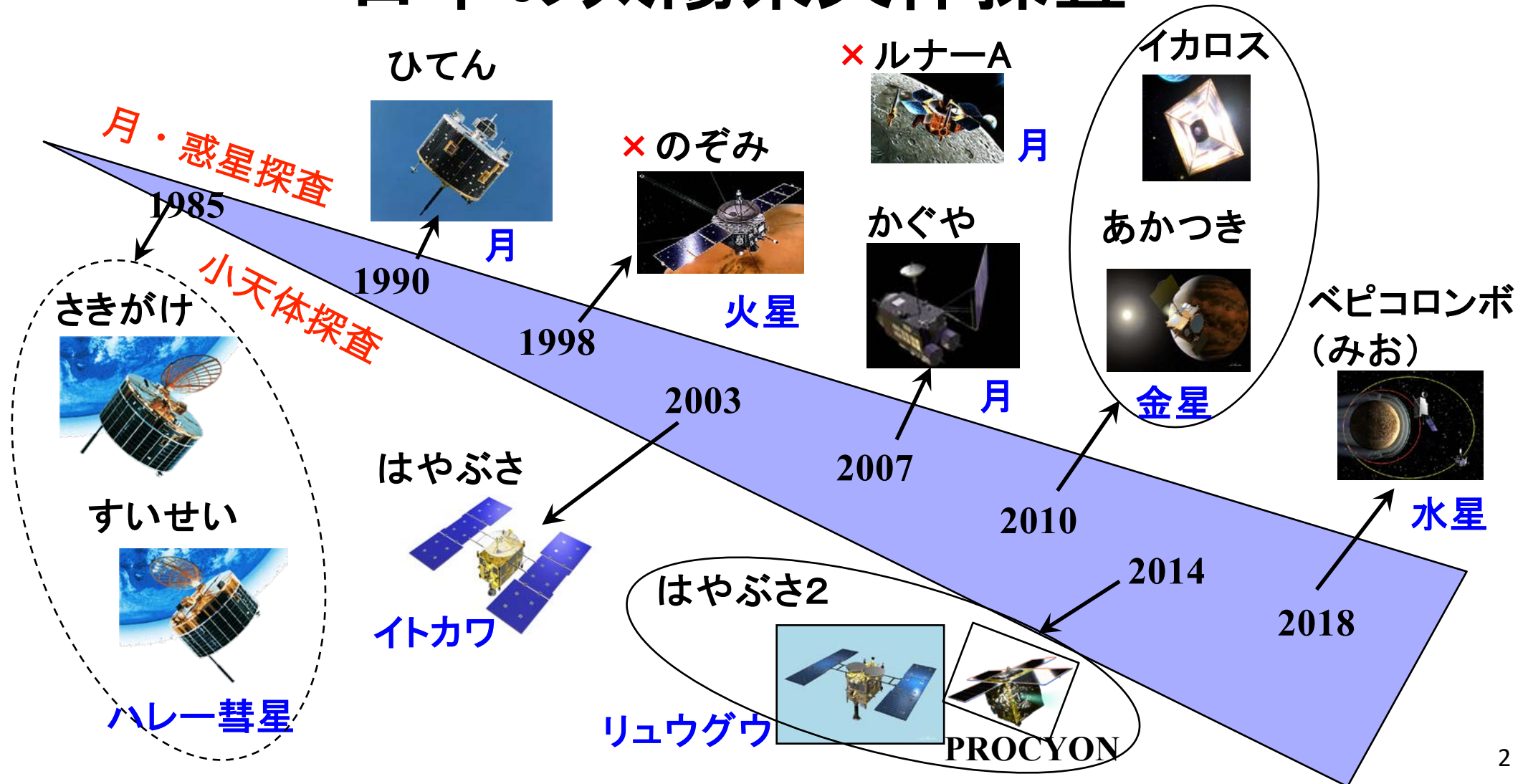
「はやぶさ2」と宇宙天気情報



2019年11月11日@日本科学未来館、東京

吉川真(JAXA はやぶさ2プロジェクト)

日本の太陽系天体探査



太陽の影響による探査機の不具合

火星探査機「のぞみ」

探査機「のぞみ」故障
文部科学省宇宙科学研究所は24日、火星に向かって飛行中の探査機「のぞみ」で故障が発生、観測ができなくなったと発表した。今のところ復旧のめどが立っていない。4月に太陽で大規模な活動が起き、発生した高エネルギー粒子が当たって電源部の一部が異常になったのが原因。通信機能が止まって観測データを地球に送れず、姿勢制御も難しくなった。

2002
5.25
7月14日

- ・「のぞみ」からのテレメトリーなし(2002年4月24日)
- ・姿勢制御不能、軌道制御不能
- ・一時的には、「のぞみ」からの電波もなし(2002年5月15日～7月14日)

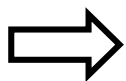
小惑星探査機「はやぶさ」

- ・2003年11月4日、X28の太陽フレア
- ↓
- ・太陽電池の発電量が低下
- ↓
- ・イオンエンジンの運転時間の延長
- ↓
- ・イトカワ到着予定が2005年6月から2005年9月に延期

「はやぶさ」ミッション



打ち上げ
2003年5月9日



地球スイングバイ
2004年5月19日



イトカワ到着
2005年9月12日

リアクションホイール故障

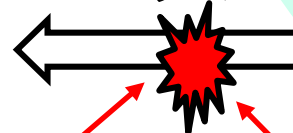
ミネルバの着地失敗

観測・サンプル採取

不時着



深刻な
トラブル



イオンエンジン故障

燃料漏れ、通信途絶、バッ
テリー故障

プロジェタイル
発射されず



地球帰還
2010年6月13日



「はやぶさ2」では...



3. 小惑星到着に備えて



■「はやぶさ」のトラブルに対する「はやぶさ2」の対応

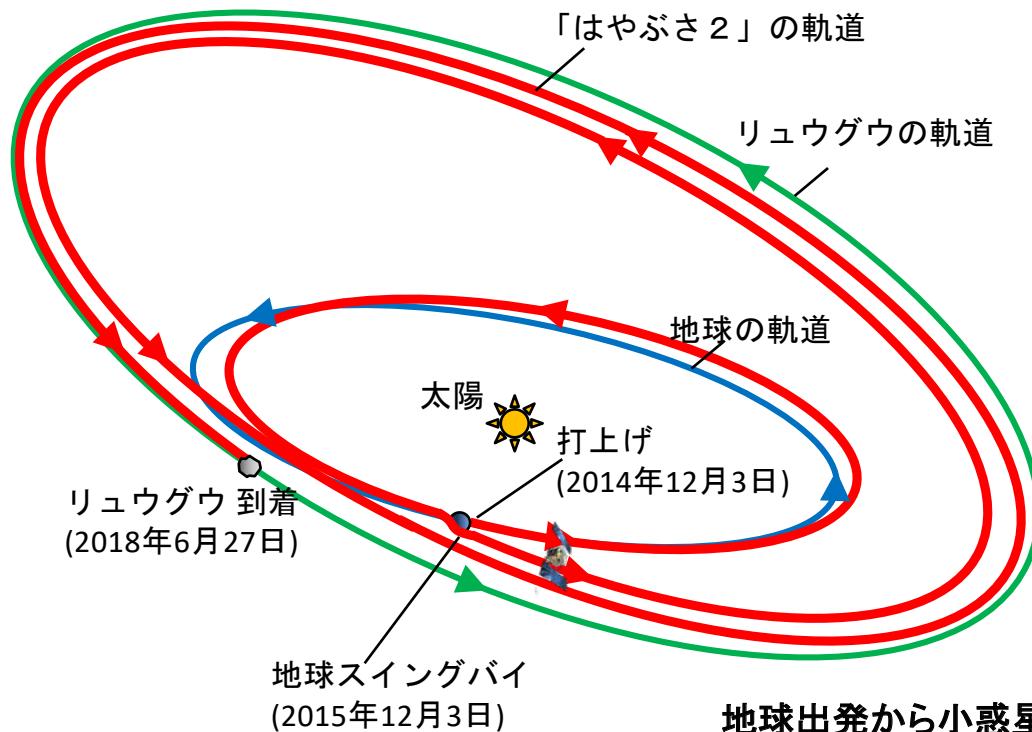
項目	「はやぶさ」での事象	「はやぶさ2」での対応
太陽フレア	2003年11月4日: 太陽フレアにより太陽電池パドルに 障害が生じ、発電量が下がった。	情報通信研究機構(NICT)に協力をお 願いし、「はやぶさ2」方向の宇宙天気 予報を出してもらっている。
リアクション ホイール:RW	2005年7月31日:X軸RWが故障 2005年10月3日:Y軸RWが故障 (Z軸RW(1台)のみ機能)	Z軸RWを2台搭載し、合計4台とした。 RWを使わない運用モード(ソーラーセ イルモード)により、RWの温存運用。
ミネルバ	2005年11月12日: 第2回降下リハーサルでミネルバを 分離するも、小惑星表面に降ろすこ とに失敗した。	「はやぶさ」での失敗は、ミネルバ分離 のタイミングが探査機の運用と整合し ていなかったためなので、運用をより 慎重に行う。
タッチダウン	2005年11月20日:1回目は不時着 2005年11月26日:2回目はタッチダ ウンは成功するも、プロジェクタイ ル不発。その後、燃料漏れに始ま る深刻なトラブルへ。	タッチダウン前に小惑星表面を詳細に 調べ、タッチダウンシーケンスを綿密 に検討し、実行する。

11

2017年12月14日の
記者説明会資料より

はやぶさ2の軌道

打ち上げ後、地球軌道に近い軌道を描いて飛行し、ちょうど1年後に地球に戻り、スイングバイを行った。スイングバイ後は、小惑星リュウグウ(Ryugu)の軌道に近い軌道に入り、太陽を約2周したあと、リュウグウに到着する。リュウグウが1周余り太陽の周りを公転するあいだ滞在し、その後、リュウグウを離れて、太陽の周りを1周弱回った後、地球に帰還する。



イベント	日にち
打ち上げ	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
小惑星出発	2019年11-12月
地球帰還	2020年11-12月

地球出発から小惑星到着まで

はやぶさ2の軌道(回転座標系)

地球出発	2014/12/03
地球スイングバイ	2015/12/03
リュウグウ 到着	2018/6/27
リュウグウ 出発	2019/11-12
地球再突入	2020/11-12

$C3=21\text{km}^2/\text{秒}^2$

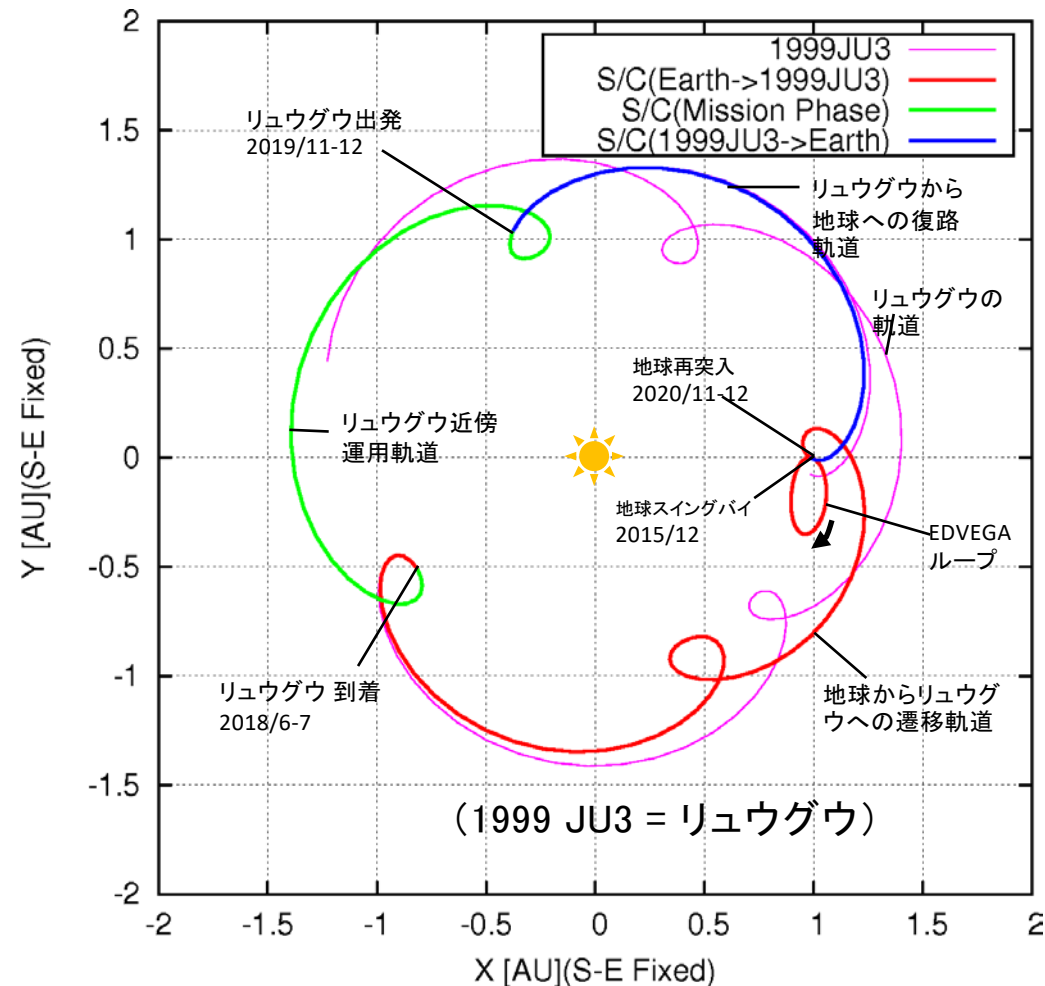
イオンエンジン総インパルス量
=2km/秒

再突入速度=11.6km/秒

総飛行時間=6年(巡航 4.5年)

動力飛行総時間=1.5年

総飛行距離=52億4千万km



NICTからいただいた宇宙天気情報

Sent: Thu, 19 Oct 2017 15:05:40 +0900

Subject: Re: 太陽風嵐の情報

竹内さま、

昨日、はやぶさ2の方向へ向かうコロナ質量放出が発生しました。
この現象に伴いSTEREO Aで高エネルギープロトンfluxの上昇が続いています。
非常に危険なレベルではないと思われますが、何らかの影響が出ていないかご注意ください。

STEREOの位置

<https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/where.shtml>

STEREO画像

<https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/browse/2017/10/18/index.shtml>

コロナ質量放出

https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/browse/2017/10/18/ahead_20171018_cor2_512.mpg

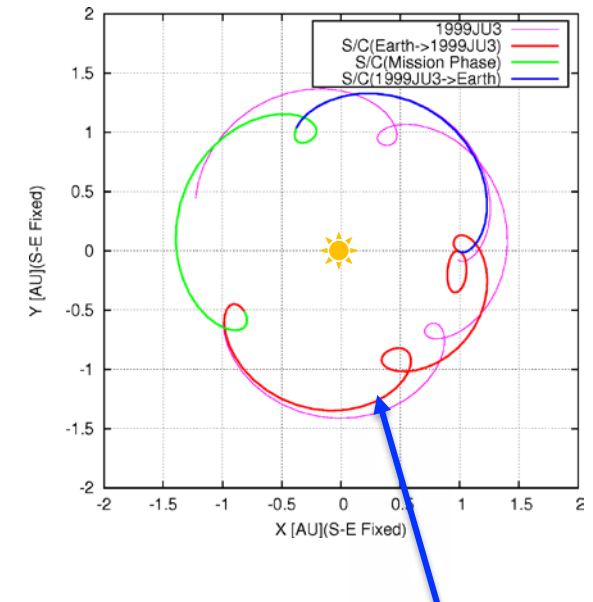
STEREO プロット

https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/browse/2017/10/18/insitu_3day.shtml

下の画像の上から2つ目が高エネルギープロトン

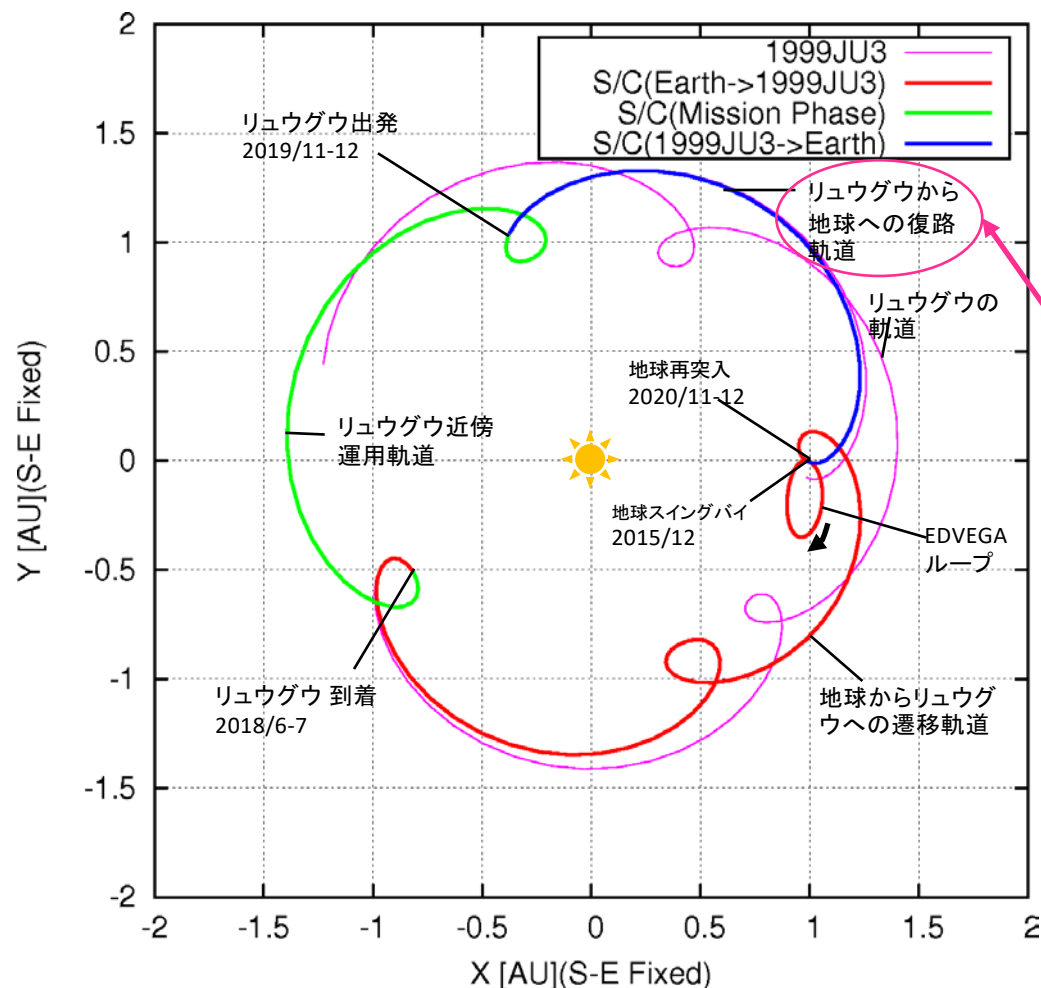
よろしくお願いいたします。

塩田



2017年10月19日

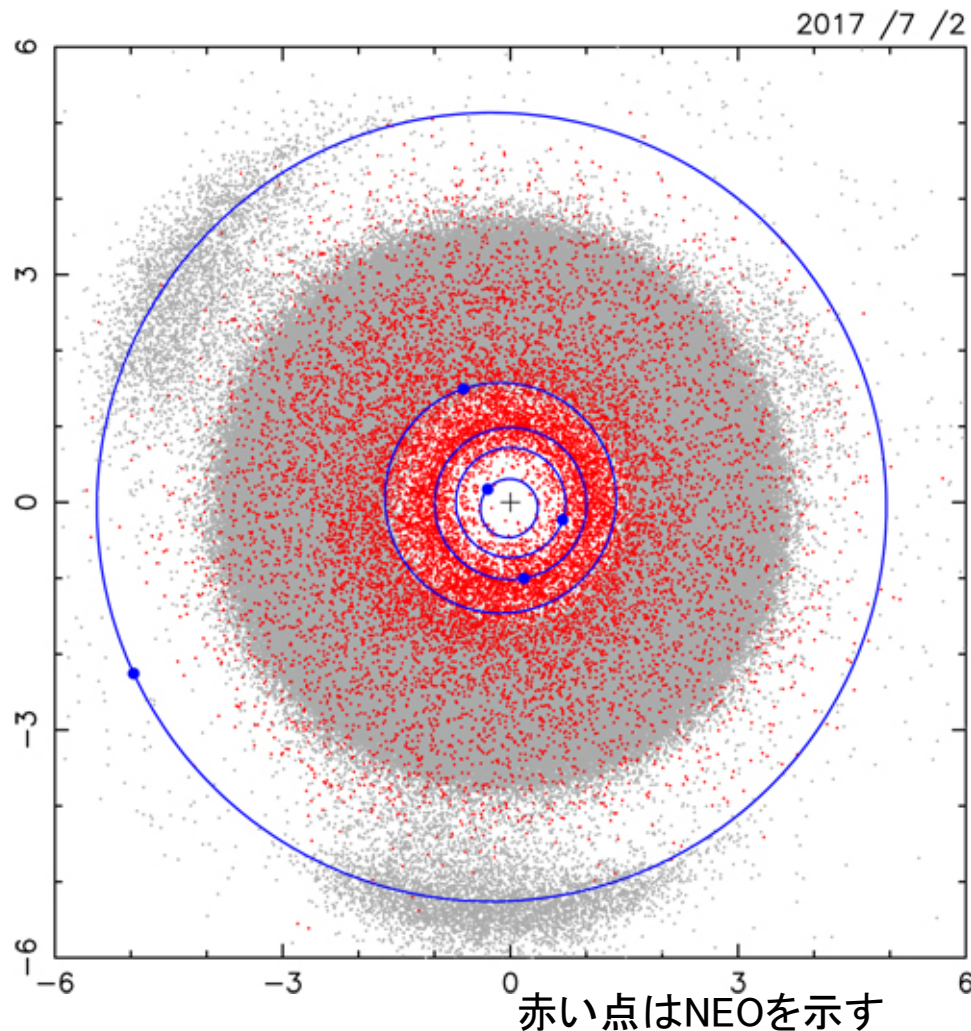
宇宙天気情報の利用



- 惑星間空間では、太陽風嵐の情報があっても、隠れようがない。
- しかし、クリティカルな運用はしないというような安全策はとることができる。

復路の時も宇宙天気情報を
よろしくお願いします。

小惑星の分布と個数



現在（2019年11月10日）、
発見され軌道が求められて
いる小惑星：

846,417個

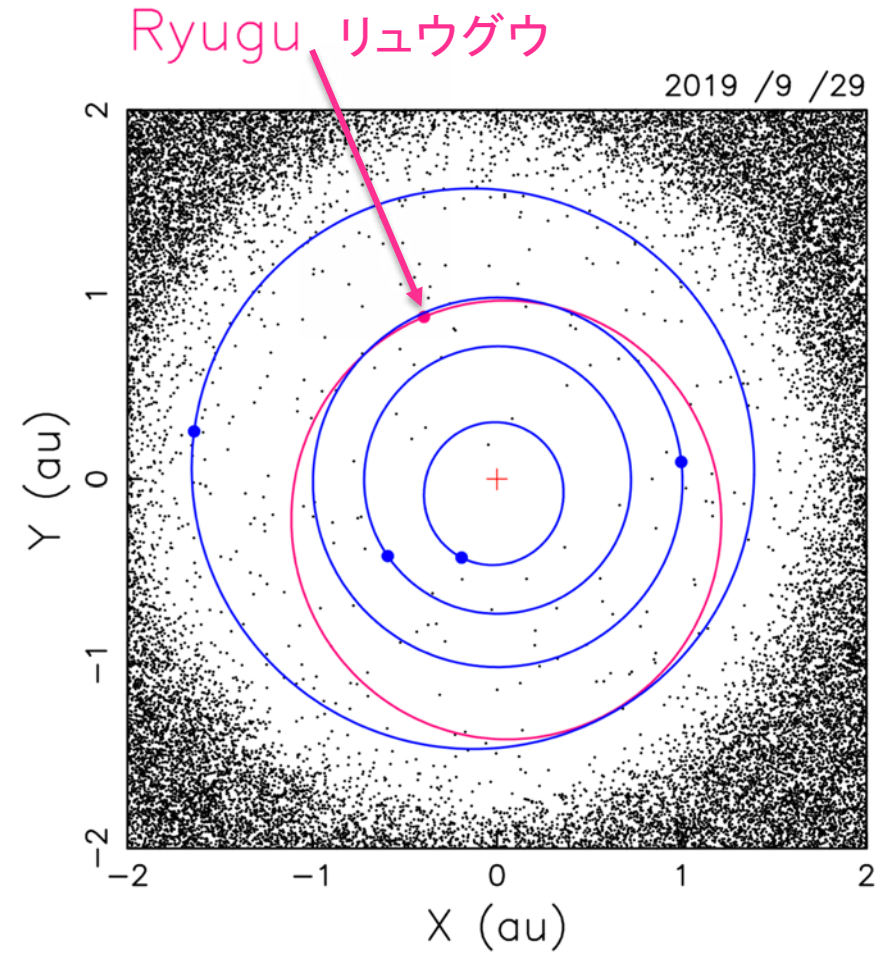
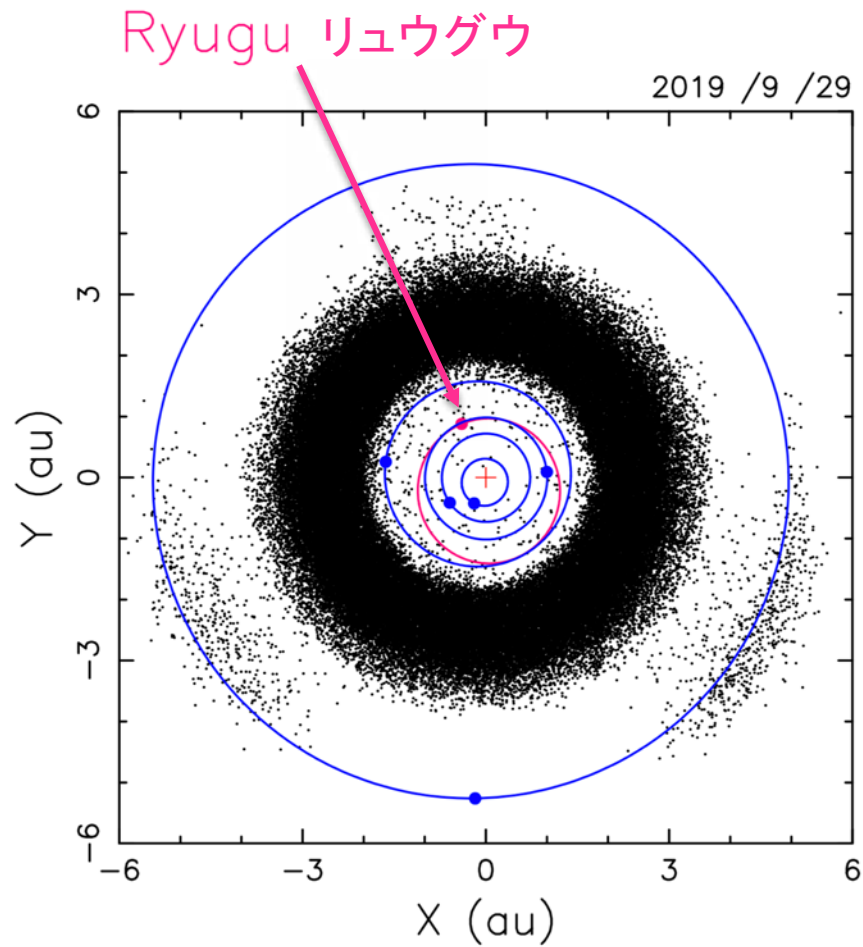
確定番号付き：

541,132個

地球軌道に接近するもの
（NEO：Near Earth Object）：

21,420個

2019年9月29日のリュウグウの位置



探査機が見た小惑星

マティルド(Mathilde)



66 × 48 × 46

NEAR Shoemaker撮影

イダ(Ida)

ガスプラ
(Gaspard)



18.2 × 10.5 × 8.9 59.8 × 25.4 × 18.6

Galileo撮影

シュテインス
(Steins)



6.67 × 5.81 × 4.47

Rosetta撮影

ルテティア(Lutetia)



121 × 101 × 75

エロス(Eros)



38 × 15 × 14

NEAR
Shoemaker撮影

トータティス(Toutatis)



1.70 × 2.03 × 4.26
嫦娥2号撮影

ベスタ(Vesta)



573 × 557 × 446 Dawn撮影

ケレス(Ceres)



直径952

イトカワ(Itokawa)



0.535 × 0.294 × 0.209

はやぶさ撮影

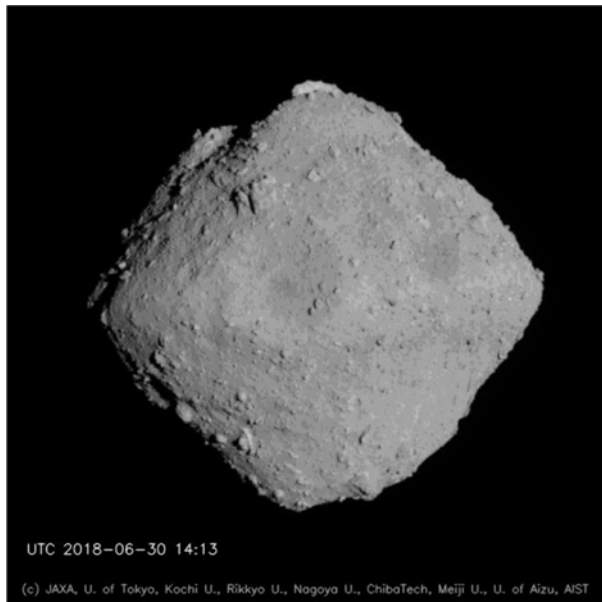
大きさは直径(端から端まで)で、単位はkm。値はトータティス以外は理科年表(平成26年版)による。トータティスの値はJPLのWebより。

小惑星探査: 2018年以降の展開

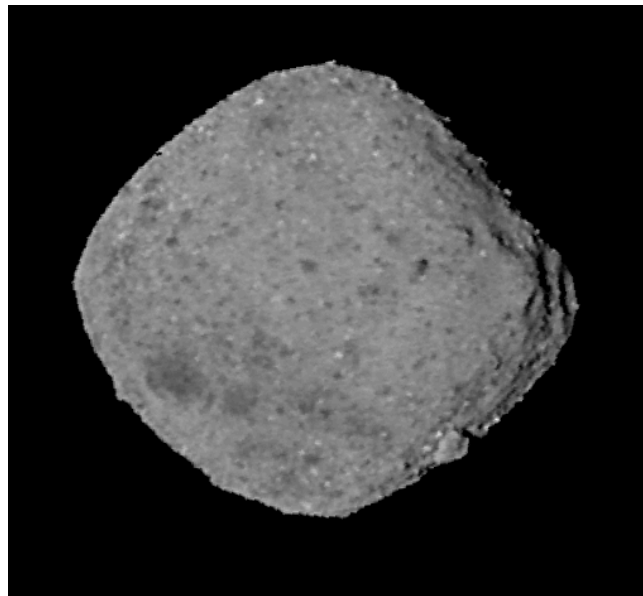
リュウグウ
(Ryugu)

ベヌー
(Bennu)

ウルティマ・トゥーレ
(Ultima Thule)



赤道直径: 約1000m
はやぶさ2

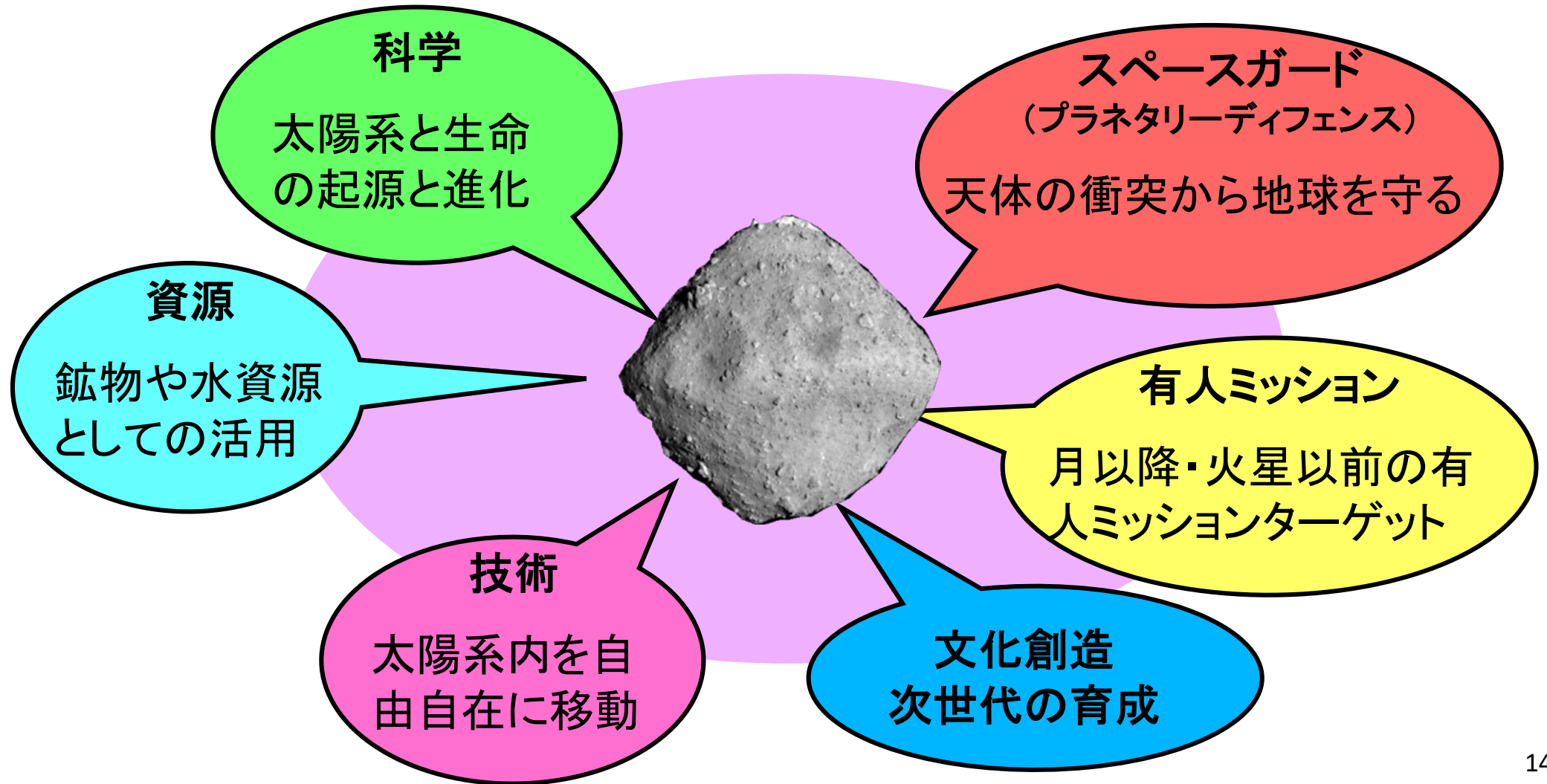


赤道直径: 約500m
オサイリス・レックス
OSIRIS-REx

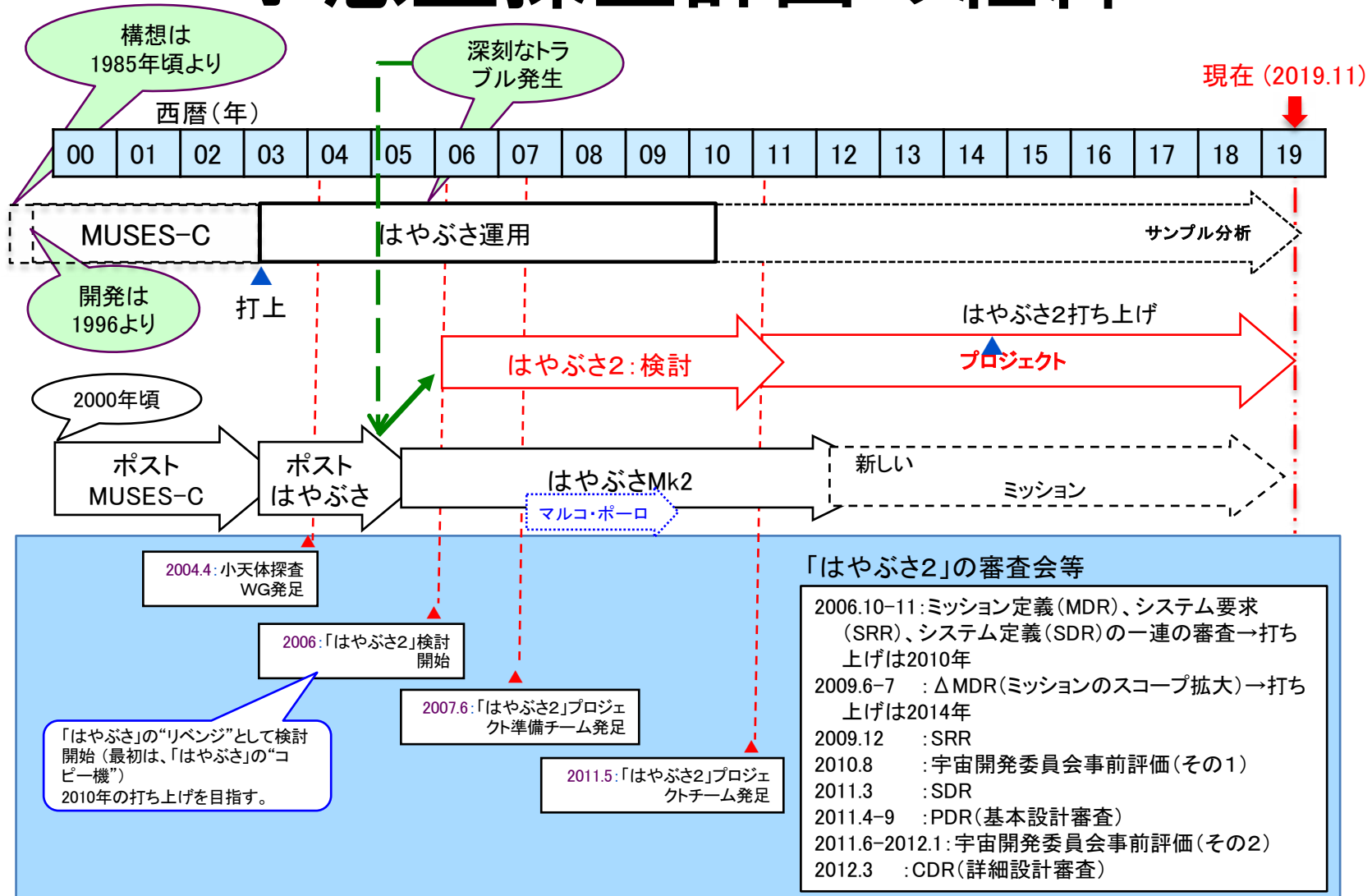


直径19 kmと直径14 km
ニュー・ホライズンズ

小天体探査がなぜ重要か



小惑星探査計画の経緯



「はやぶさ2」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、地球の水の起源

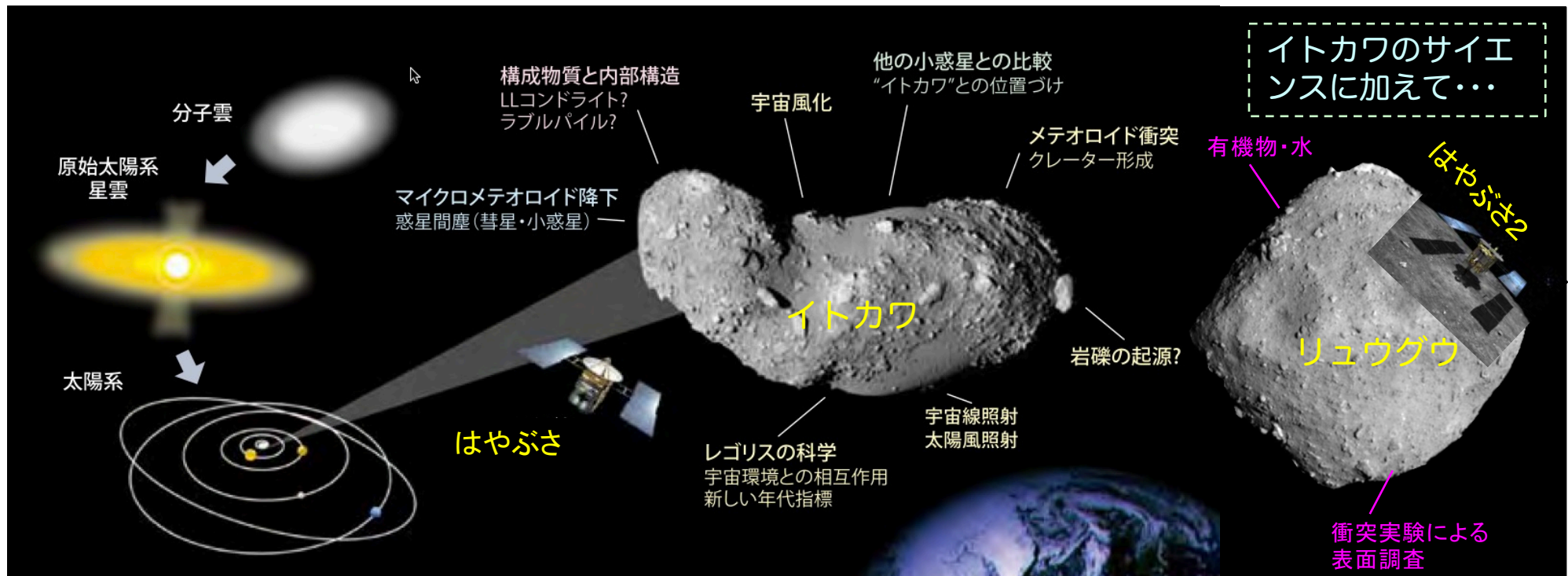
2. 技術的意義

「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
より確実な探査技術、新たな技術への挑戦

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
※プラネタリーディフェンス、資源利用、有人探査…

小惑星の科学



■太陽系の誕生と進化を解明する

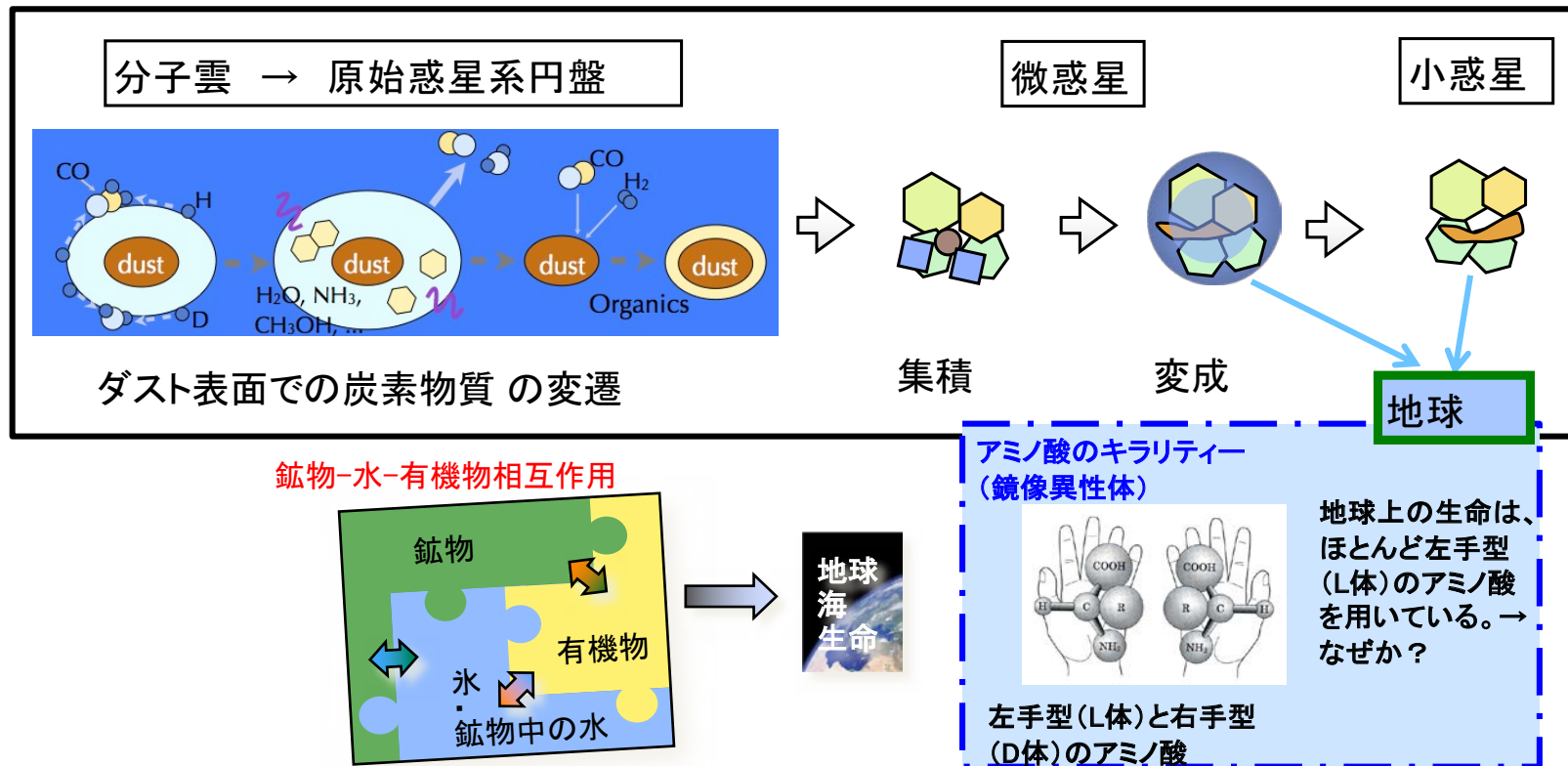
- ・どのような物質がどのような状態で存在していたのか?
- ・惑星はどのようにして誕生し進化したのか?
- ・生命の原材料 (有機物・水) は何か?

■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」による有機物の解明

水や有機物などの揮発性物質は、分子雲の中で塵(ダスト)表面で作られ、原始太陽系円盤内や微惑星で水質変成・熱変成を受けて変化し、最終的に地球に蓄積して地球生命の材料になったと考えられる。この過程で、どのような物質が存在したのかを解明する。



ミッションの流れ

打ち上げ
2014年12月3日



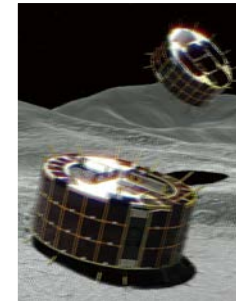
地球スイングバイ
2015年12月3日



リュウグウ到着
2018年6月27日



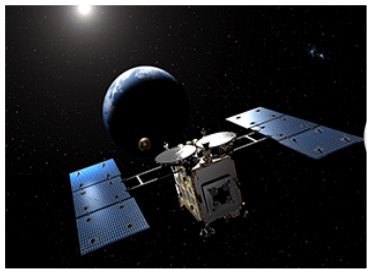
MINERVA-II-1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日

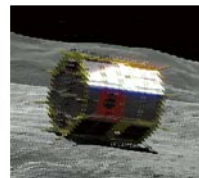


リュウグウ出発
2019年末

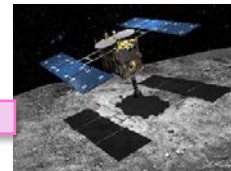


地球帰還
2020年末

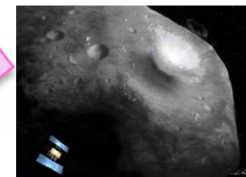
MINERVA-II-2
2019年10月3日



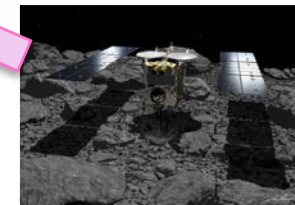
第2回タッチ
ダウン
2019年7月11日



衝突装置
2019年4月5日

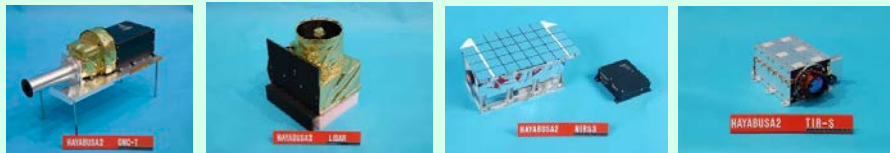


第1回タッチダウン
2019年2月22日



(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)

「はやぶさ2」探査機



ONC-T

LIDAR

NIRS3

TIR

科学観測機器

MASCOT

MINERVA-II-1

MINERVA-II-2



(DLRとCNES製作)



(東北大およびミネルバ2
コンソーシアムによる)

小型着陸機・ローバ

「はやぶさ2」打ち上げから巡航フェーズへ



- ロケット: H-IIAロケット26号機(202型)
- 打上げ予定日時: 2014年11月30日(日) 13時24分48秒 ← 天候判断により延期
- 打ち上げ日時: 2014年12月3日(水) 13時22分04秒
- 打上げ予定(可能)期間: 平成26年11月30日～12月9日
- 打上げ場所: 種子島宇宙センター

クリティカル運用 (2014年12月5日まで)

- 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

初期機能確認 (2015年3月2日まで)

- イオンエンジン、通信、電源、姿勢制御、観測装置などの確認
- 精密軌道決定

巡航フェーズ

- 地球スイングバイに向けた軌道制御

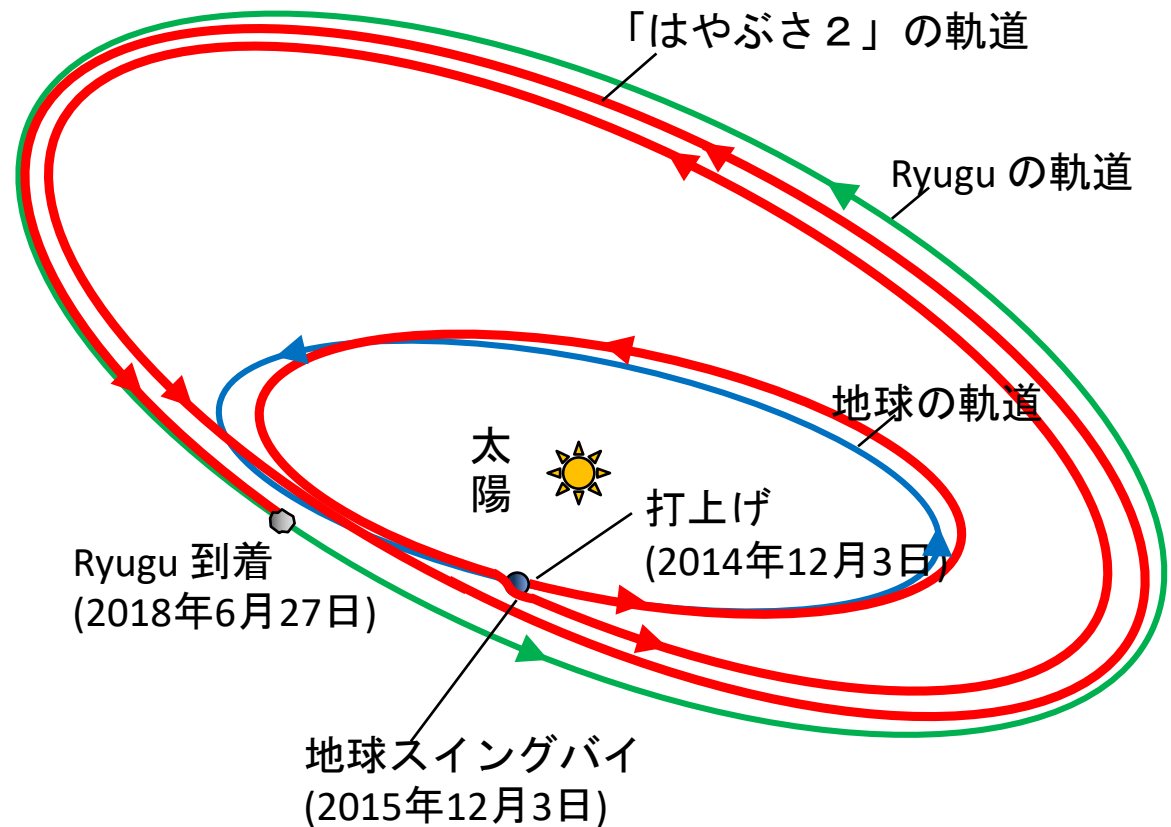
打ち上げから到着まで

2014年12月3日：打ち上げ

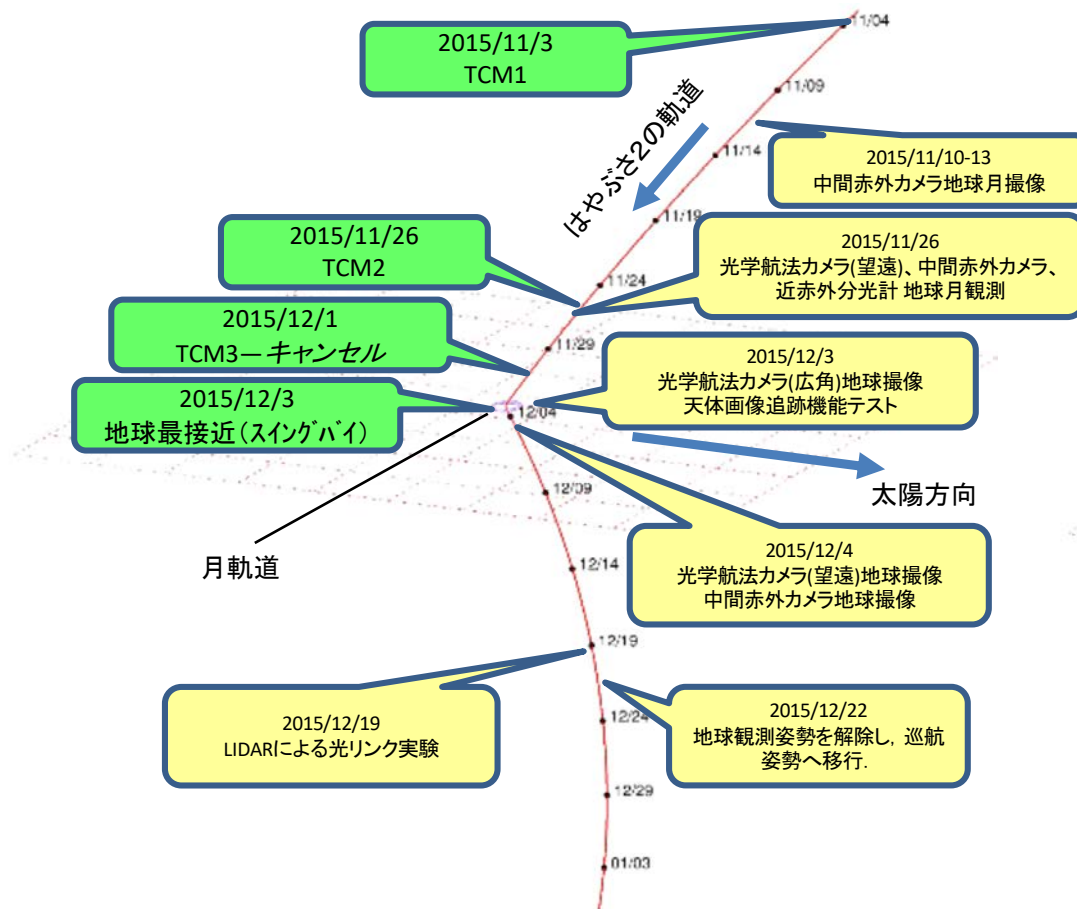
- ・初期機能確認
- ・イオンエンジン運用
- ・地球スイングバイ
- ・ソーラーセイルモード
- ・アップリン・トランスファー
- ・DDOR
- ・Ka帯通信
- ・光学航法

：

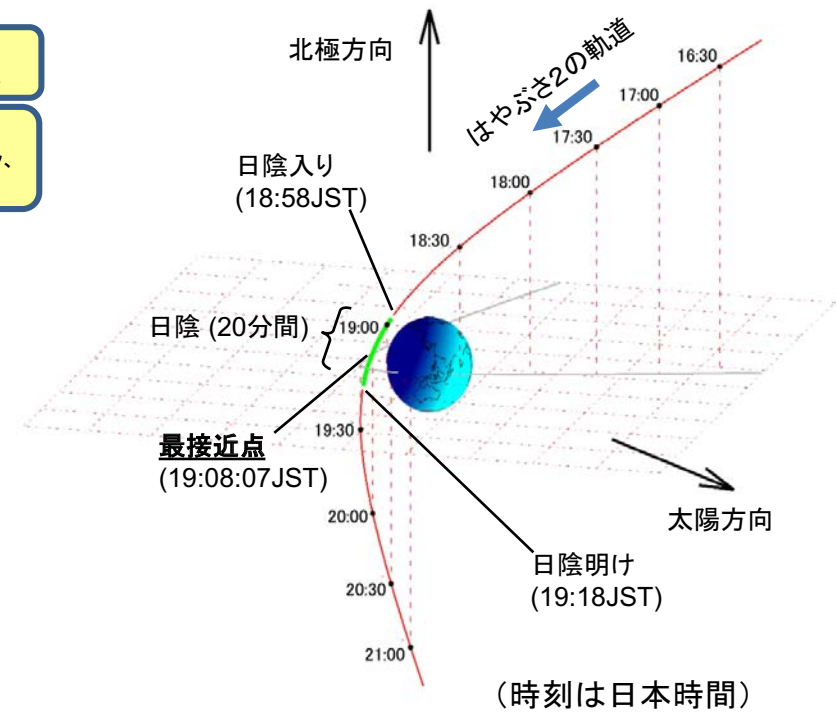
2018年6月27日：リュウグウ到着



スイングバイ前後の運用



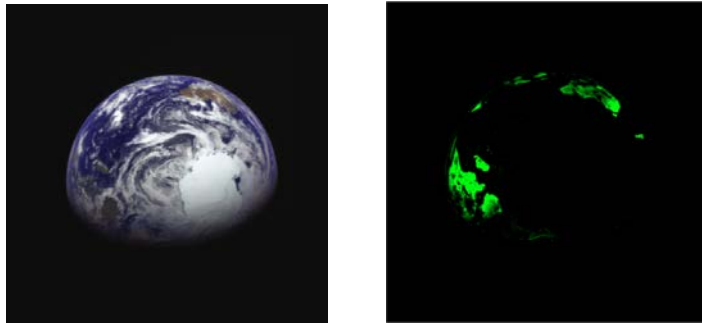
スイングバイ前後の主な運用



地球最接近時の軌道

スイングバイのときの観測・実験

ONC-T

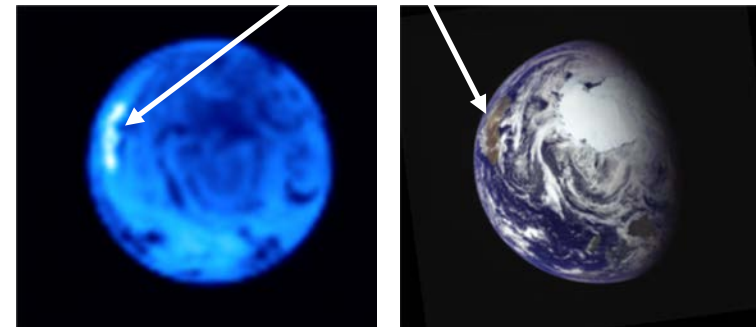


カラー合成

植生

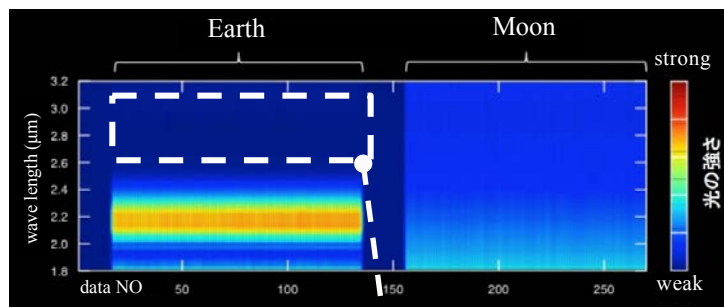
TIR

オーストラリア大陸



熱放射写真

NIRS3

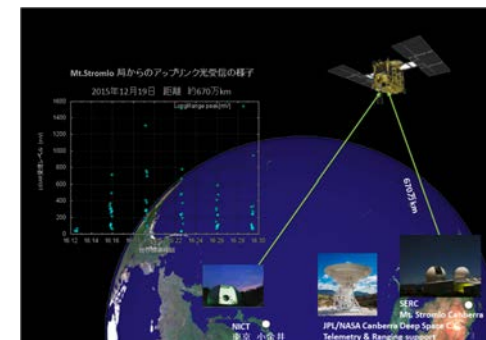


水による吸収

signal level

LIDAR

地球から探査機へレーザーを打ち受信に成功



2015年12月19日、670万km (= 0.045au)でレーザの受信成功

LIDARによる光リンク実験



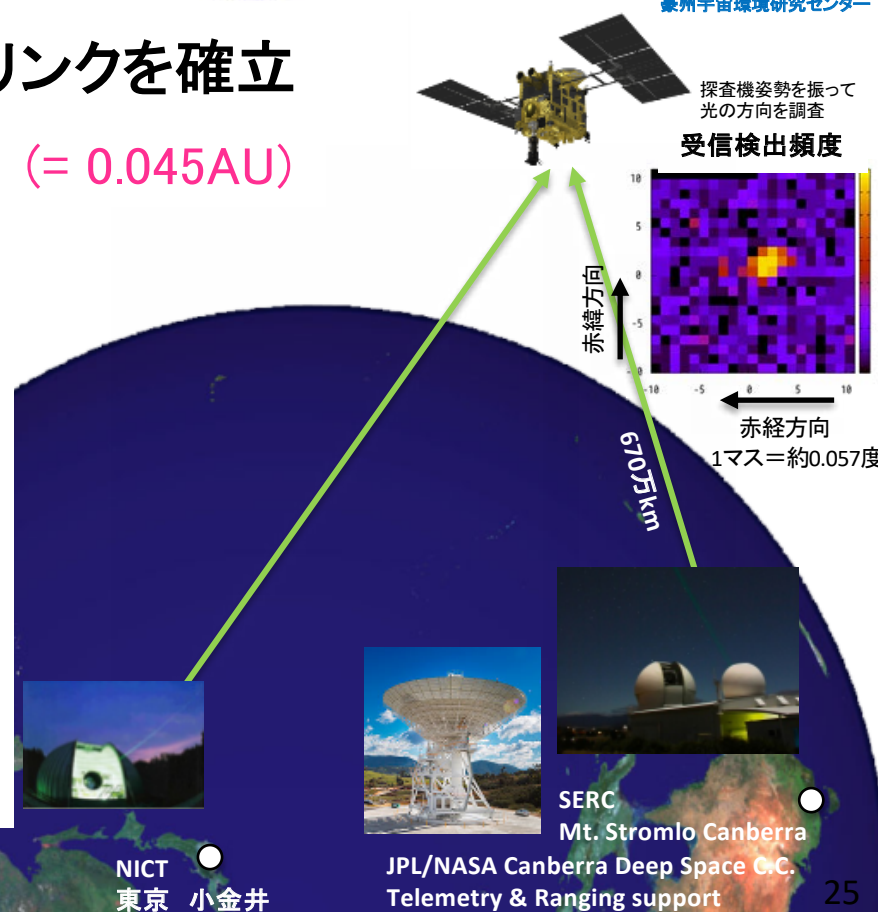
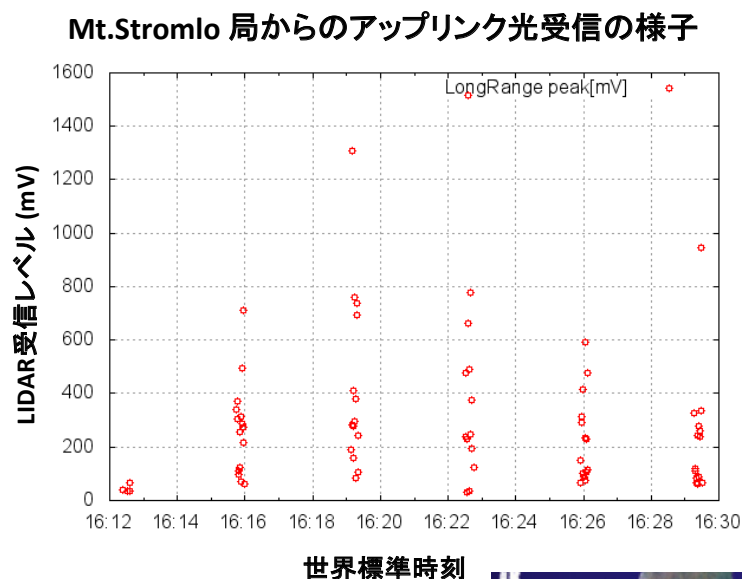
千葉工業大学
惑星探査研究センター



惑星宇宙環境研究センター

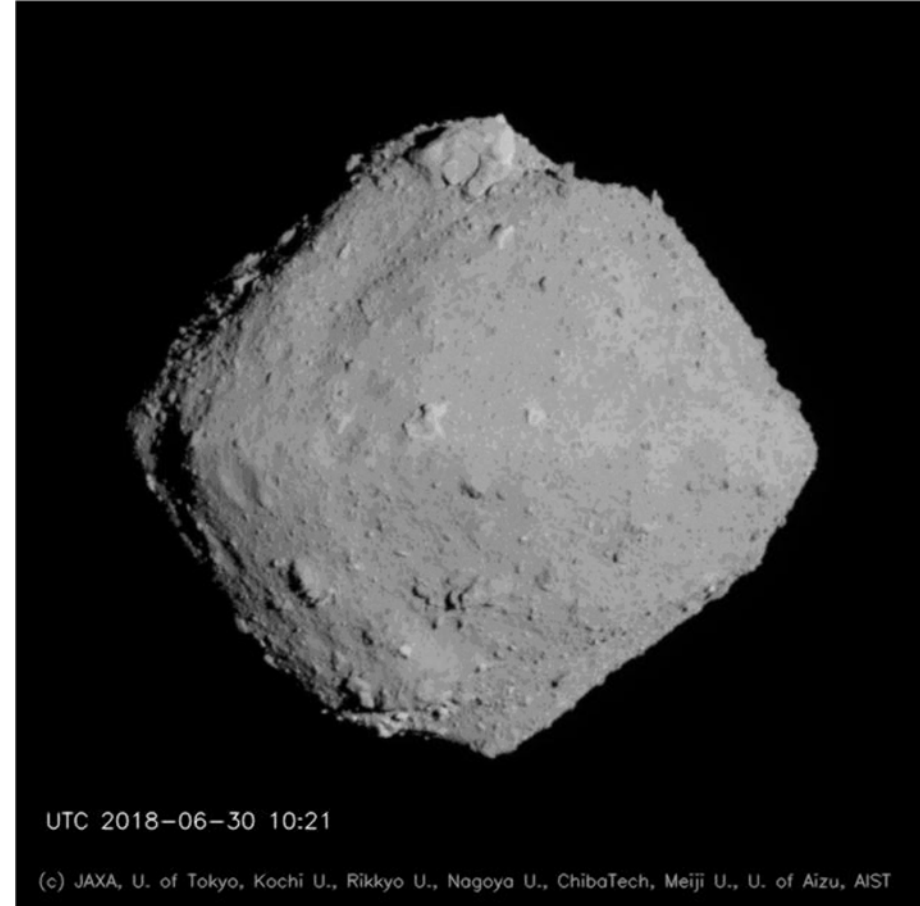
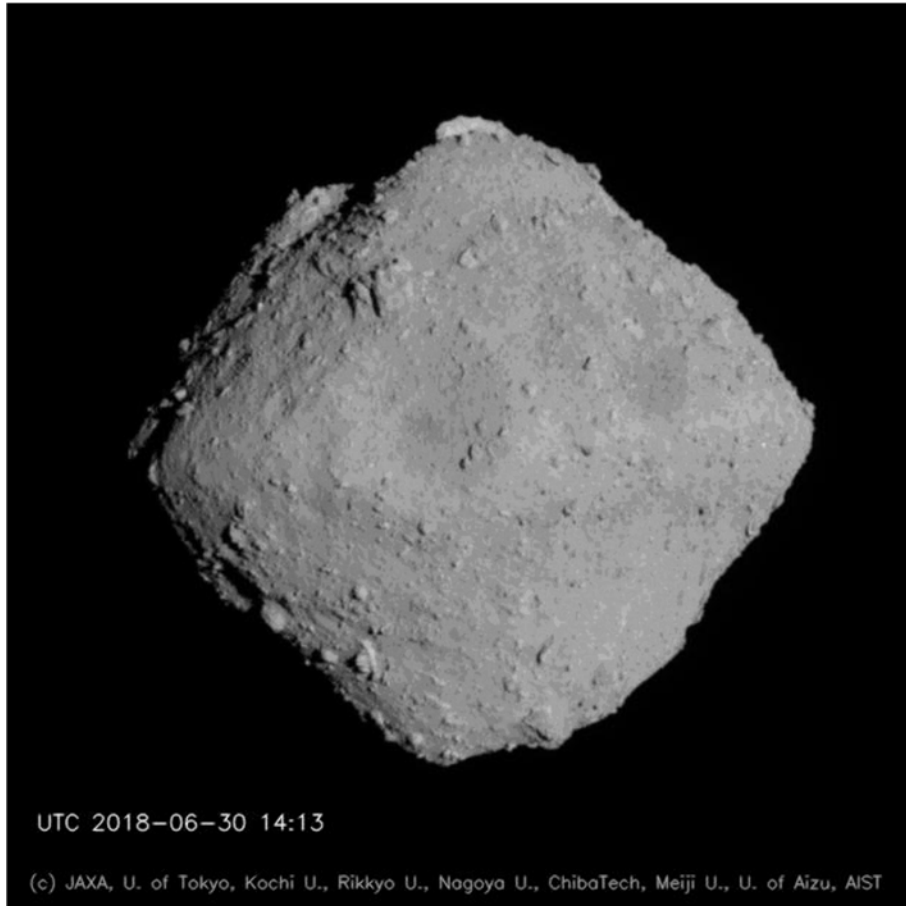
地上-深宇宙探査機間の1Way 光リンクを確立

2015年12月19日 距離 約670万km (= 0.045AU)



小惑星リュウグウ

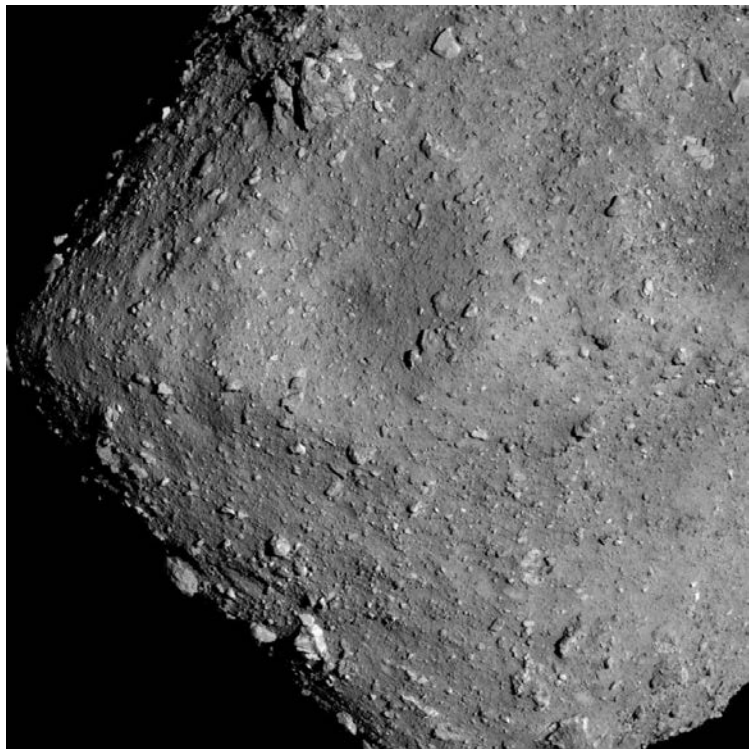
2018年6月30日



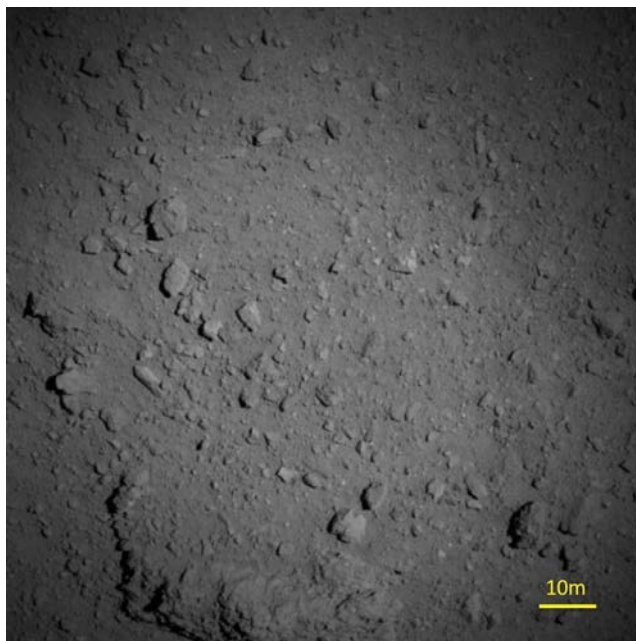
(画像クレジット: ONC※)

高度20kmより

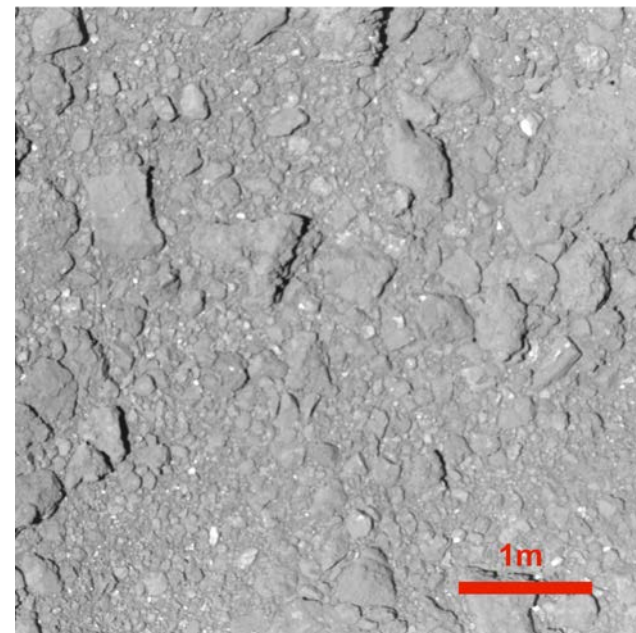
小惑星リュウグウ



高度6kmより
2018年7月20日



高度1kmより
2018年8月7日

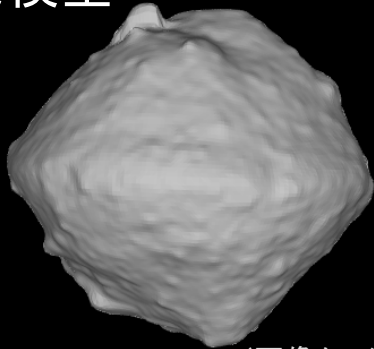


高度42mより
2018年10月15日

(画像クレジット: ONC※)

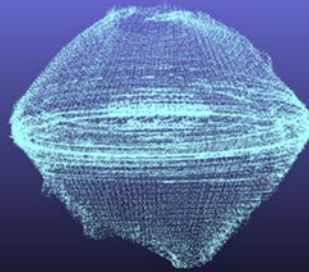
リュウグウの物理観測

形状模型



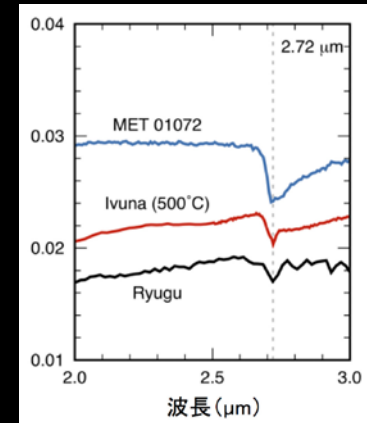
(画像クレジット:形状※)

形状(LIDARによる)



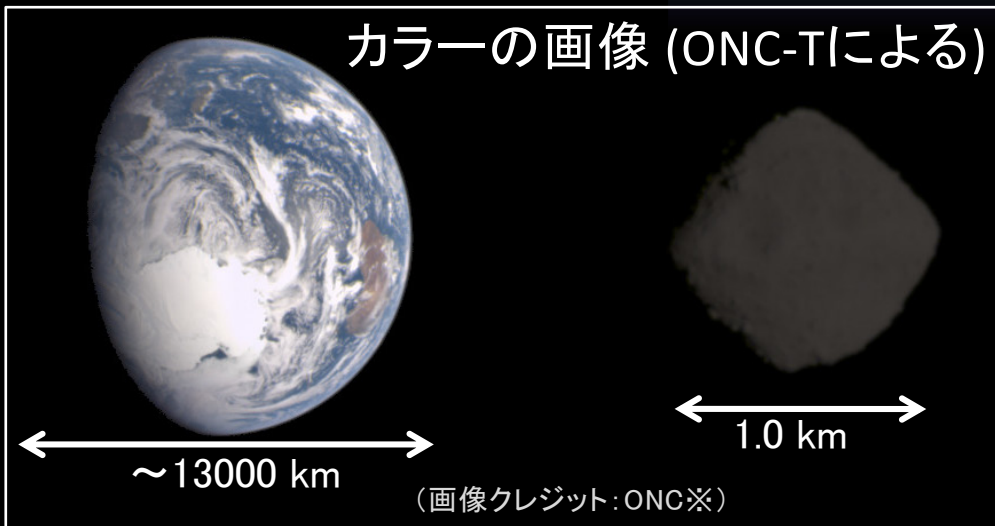
(画像クレジット:LIDAR※)

近赤外線
スペクトル
(NIRS3による)



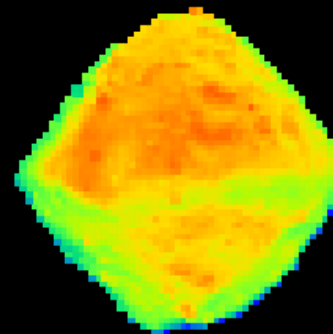
(画像クレジット:NIRS3※)

カラーの画像 (ONC-Tによる)



(画像クレジット:ONC※)

温度 (TIRによる)

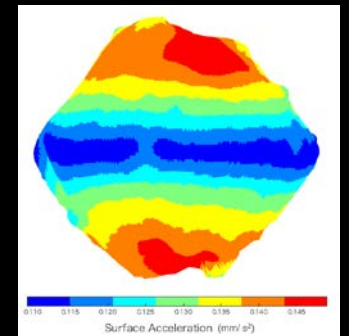


(画像クレジット:TIR※)

高い

低い

重力



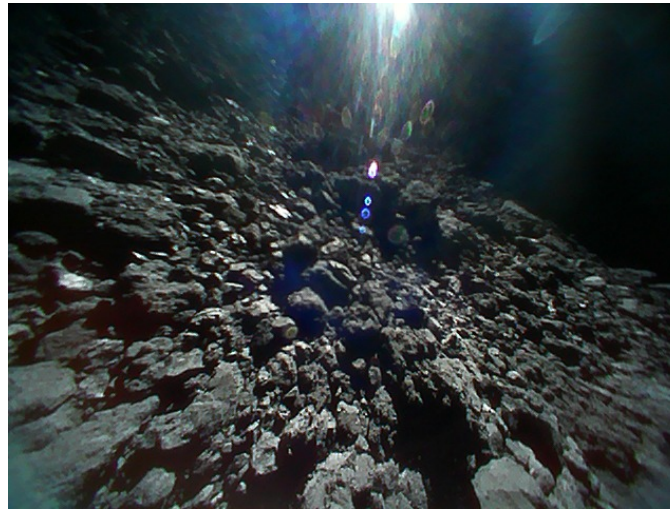
(画像クレジット:JAXA)

MINERVA-II1運用

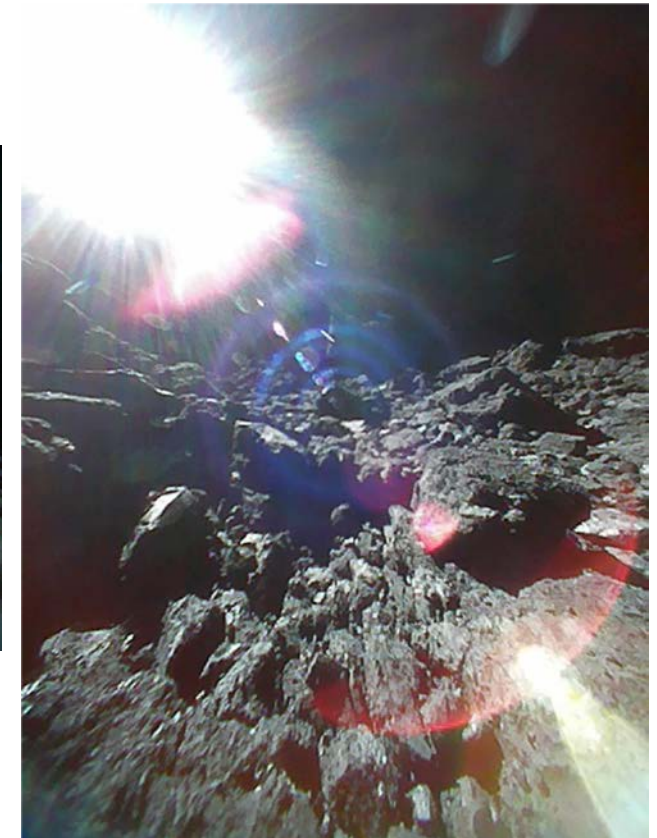
分離: 2018年9月21日



表面付近でホップして移動中
2018年9月22日



リュウグウ表面
2018年9月23日



リュウグウ表面で見た太陽の動き
2018年9月23日

(画像クレジット: JAXA)

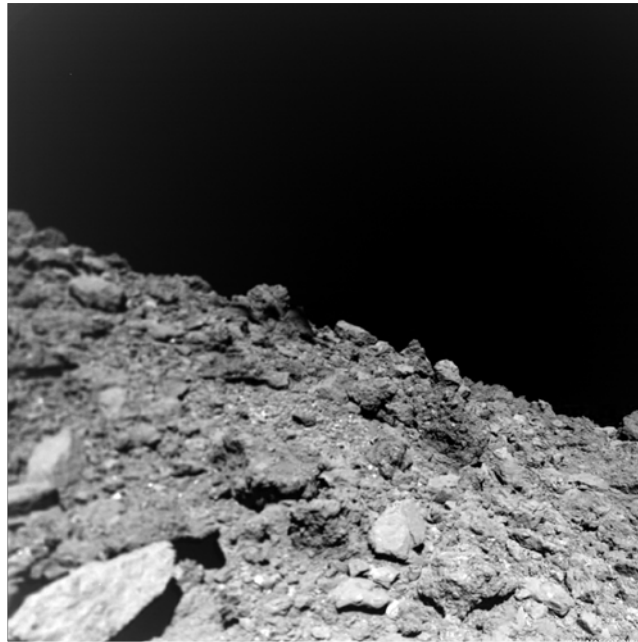
MASCOT運用

分離: 2018年10月3日



MASCOT分離
2018年10月3日

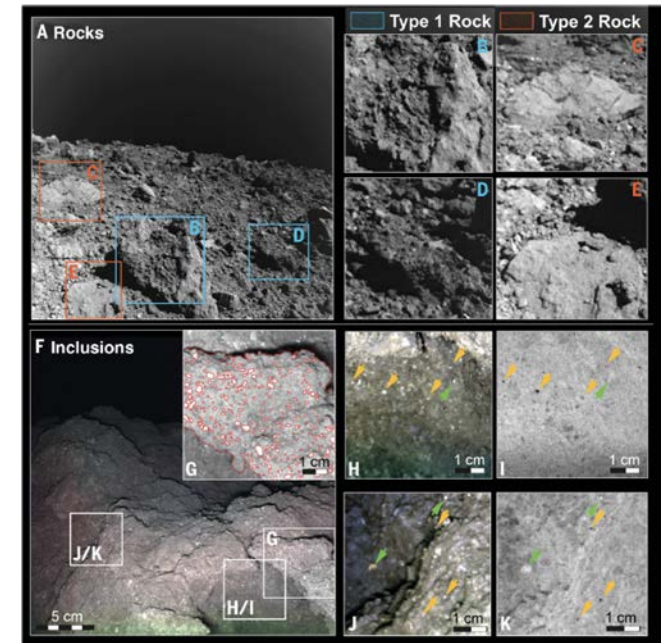
(画像クレジット: ONC※)



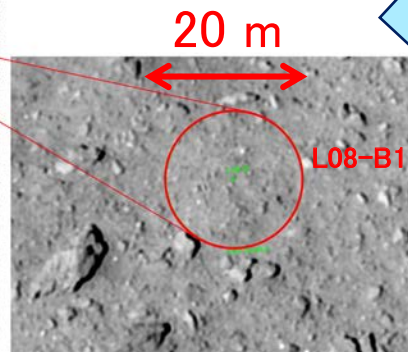
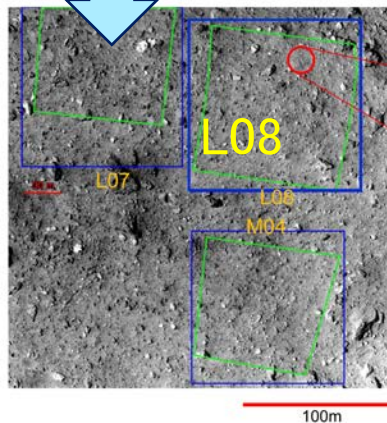
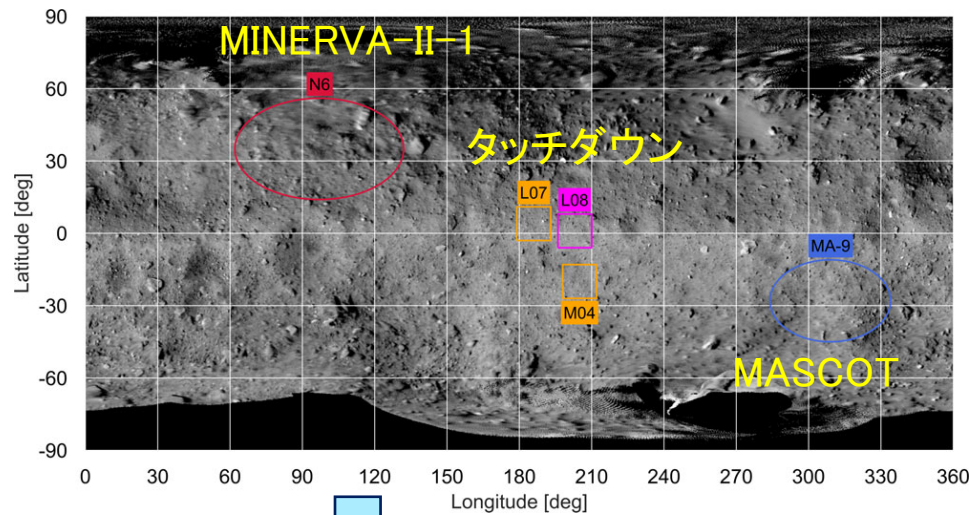
リュウグウ表面

(画像クレジット: MASCOT/DLR/JAXA)

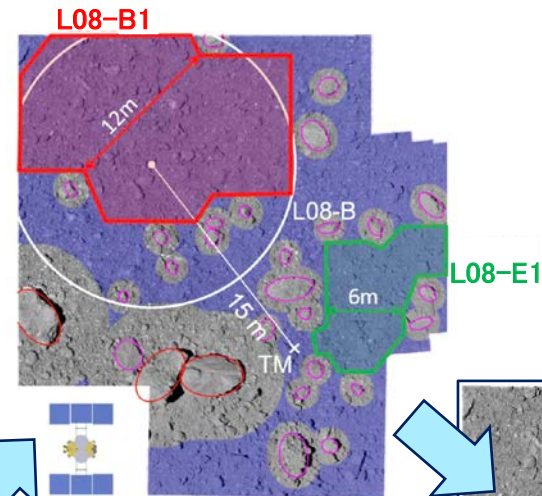
Jaumann et al., Science 365, 817–820 (2019)



着地点選定

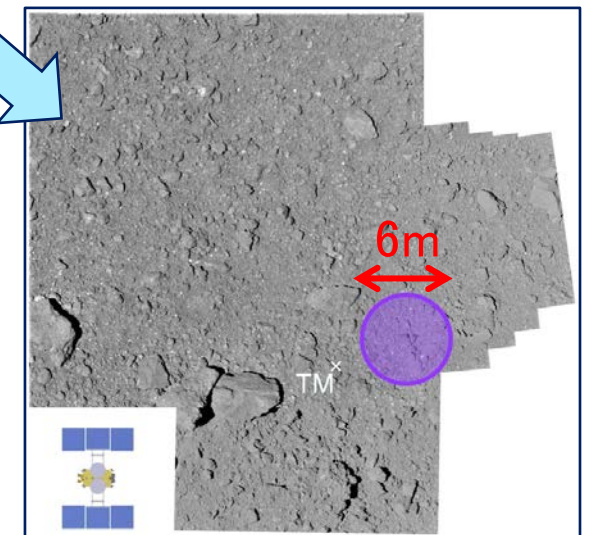


L08-B1がタッチダウン
候補地点に選定



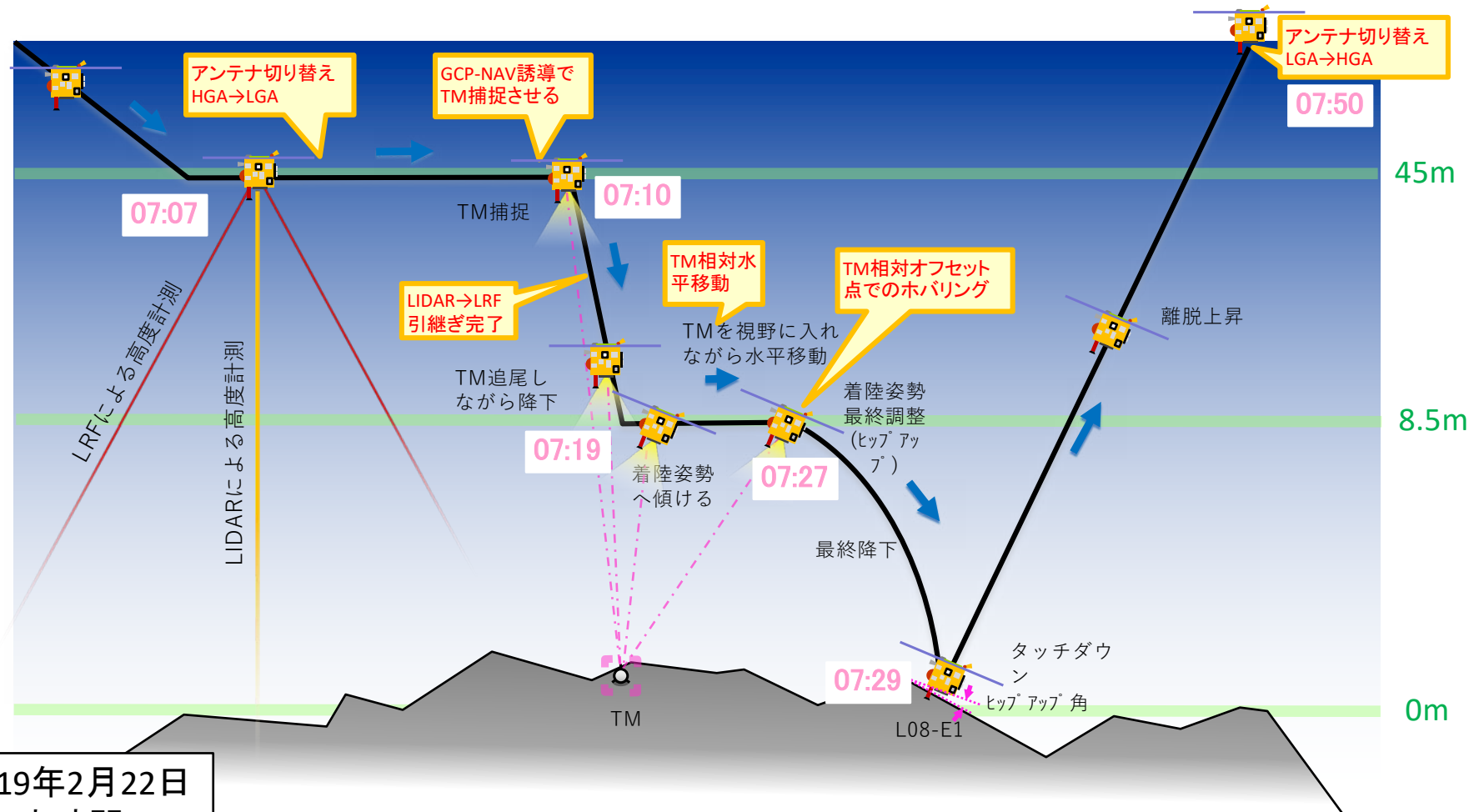
TM: ターゲットマーカ

最終的にL08-E1が選定



第1回タッチダウン運用

低高度

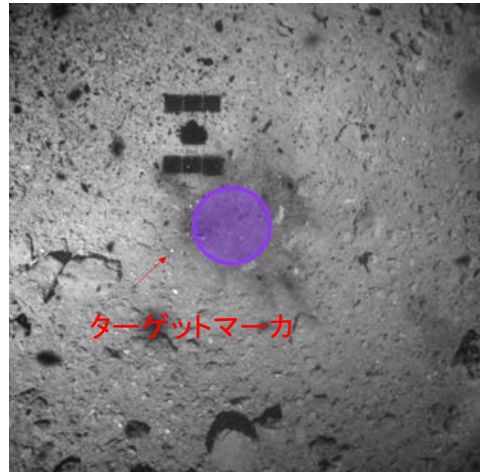
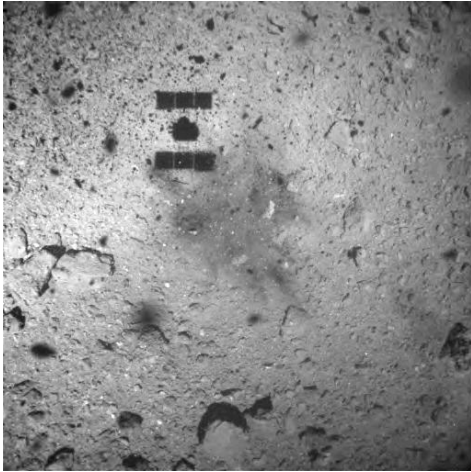


時刻は2019年2月22日の機上、日本時間

(画像のクレジット: JAXA)

第1回タッチダウン

タッチダウン: 2019年2月22日、07:29:10 (JST、機上)



タッチダウン後の様子(ONC-W1で撮影)

- ・タッチダウン誘導制御の精度: 1m

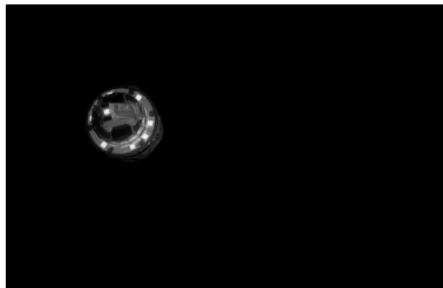


CAM-H(小型モニタカメラ)によるタッチダウン前後の撮影。最終降下59秒前から連続撮像をスタートし、撮像頻度を変えながら5分40秒間撮像。(動画:5倍速)

衝突装置 (SCI) 運用

分離: 2019年4月5日

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

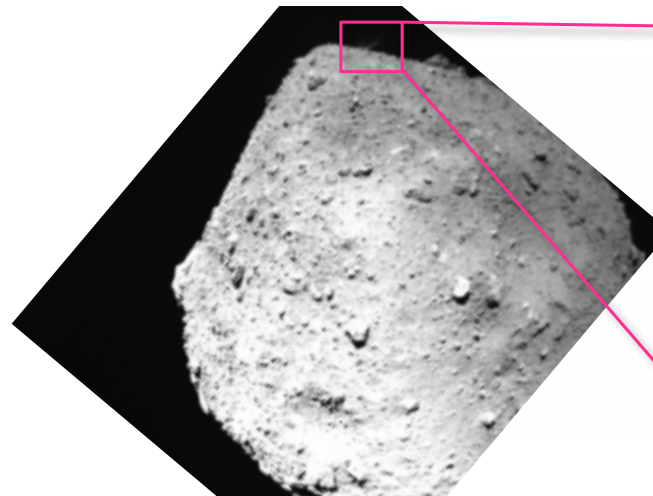
(画像クレジット: TIR※)

SCIの衝突によるイジェクタ

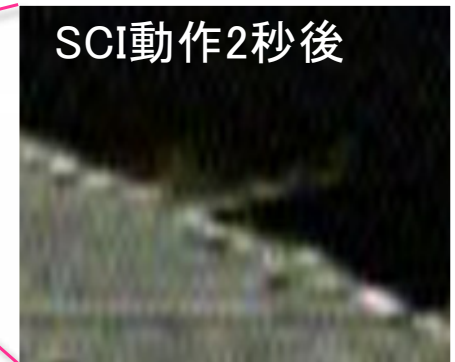
DCAM3: アナログ系で撮影



DCAM3: デジタル系で撮影

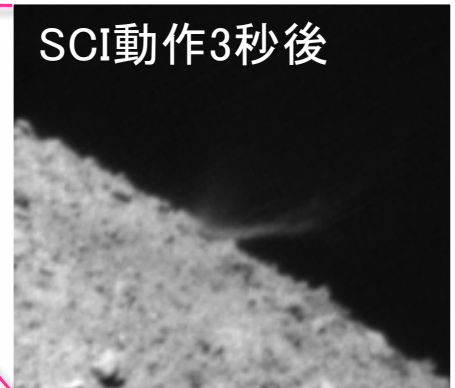


SCI動作2秒後



(画像クレジット: DCAM3アナログ※)

SCI動作3秒後



(画像クレジット: DCAM3デジタル※)

人工クレーター

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)



第2回タッチダウン:CAM-H画像

小型モニタカメラ(CAM-H)による画像。
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

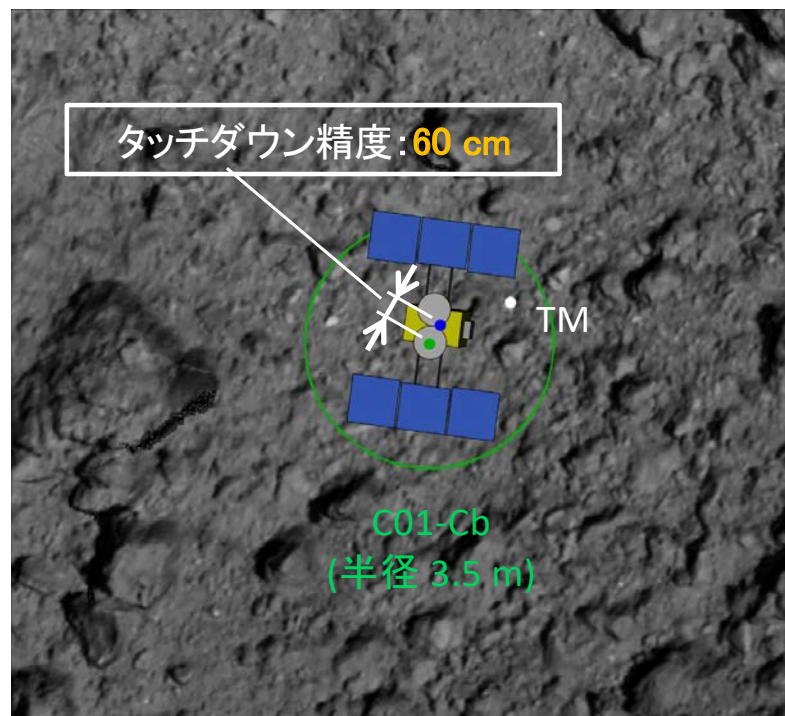


(画像のクレジット:JAXA)

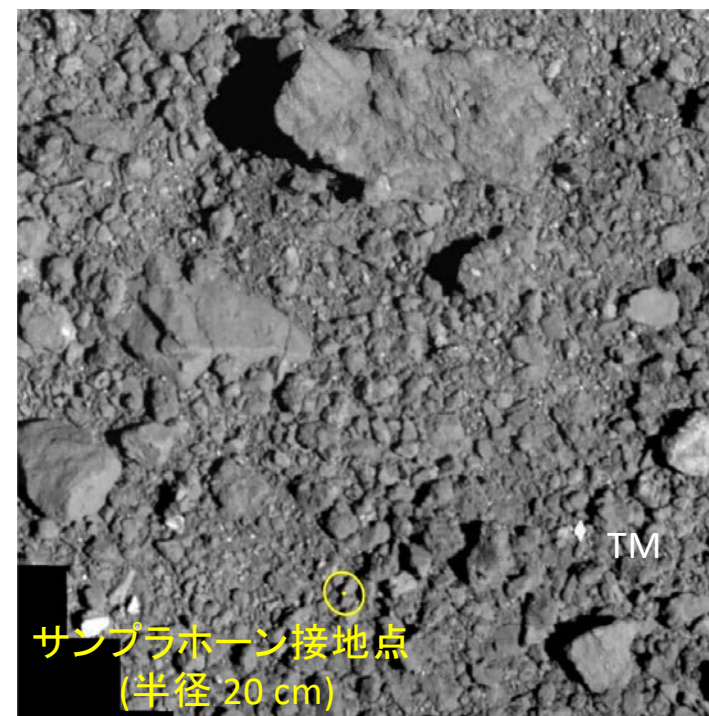
第2回タッチダウンの精度

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)

再突入カプセルの回収計画

- 2020年末頃に「はやぶさ2」は地球近傍に戻り、搭載している再突入カプセルを地上へ向けて分離、カプセルを大気圏に再突入させる予定。
- カプセルが到達する候補地域はオーストラリアのウーメラ管理区域で、2010年に地球に帰還した「はやぶさ」のカプセル回収を行ったところとほぼ同じ場所である。カプセル回収作業を行うことについてオーストラリアの宇宙機関等と調整・準備を進めている。



候補地域の様子
(2018年12月撮影)

(画像のクレジット: JAXA)

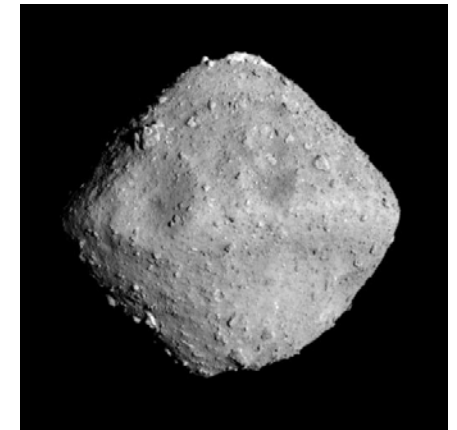
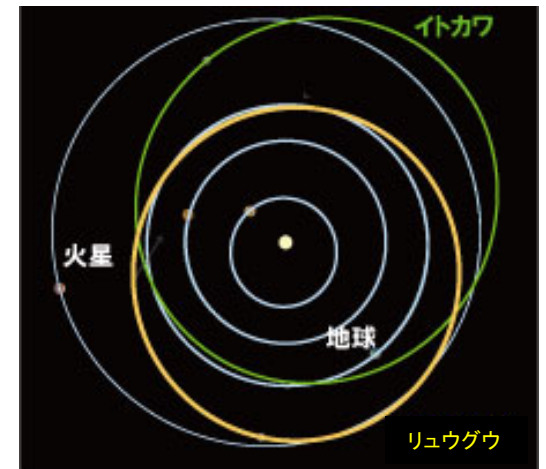
リュウグウの初期観測結果

名称 : (162173) Ryugu (リュウグウ)
仮符号 : 1999 JU₃ ※1999年5月に発見された小惑星

- コマ(独楽)型、円形の赤道形状
- 半径: 平均 約450 m (赤道半径 約500 m、極半径約440 m)
- 質量: 約4.5億トン ($4.50 \times 10^{11} \text{kg}$ 、 $GM \approx 30 \text{ m}^3 \text{s}^{-2}$) ※
- 体積: 0.377km^3
- 密度: $1.19 \text{g/cm}^3 \rightarrow$ Porosity は50%以上
- 自転軸の向き: $(\lambda, \beta) = (180^\circ, -87^\circ)$
- 赤道傾斜角: 約 8°
- 自転周期: $P = 7.63$ 時間(逆行自転)
- 反射率因子(v-band): 0.02
- クレーターの数密度: イトカワやエロスと同等
- 多数のボルダー(岩塊)の存在: 最大のものは南極付近に存在(約130m)
- 可視光におけるスペクトル: 平坦、赤道付近や極付近で青っぽい
- 近赤外におけるスペクトル: 平坦な(少し赤みがかっている)スペクトル、水による弱い吸収あり
- 輝度温度: 強いroughness効果あり(昼間における温度変化が小さい)、赤道付近で熱慣性がより大きい

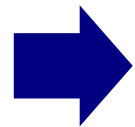
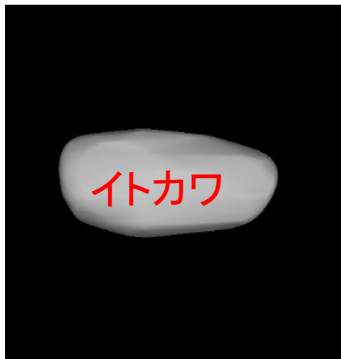
(※赤道での重力は地球の約8万分の1、イトカワの数倍の重力となる)

小惑星Ryuguの軌道



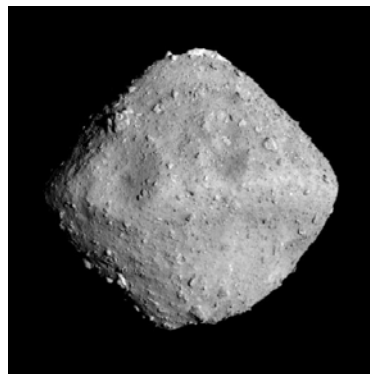
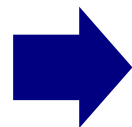
新たなる発見

■ 「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？



？ ？ ？