

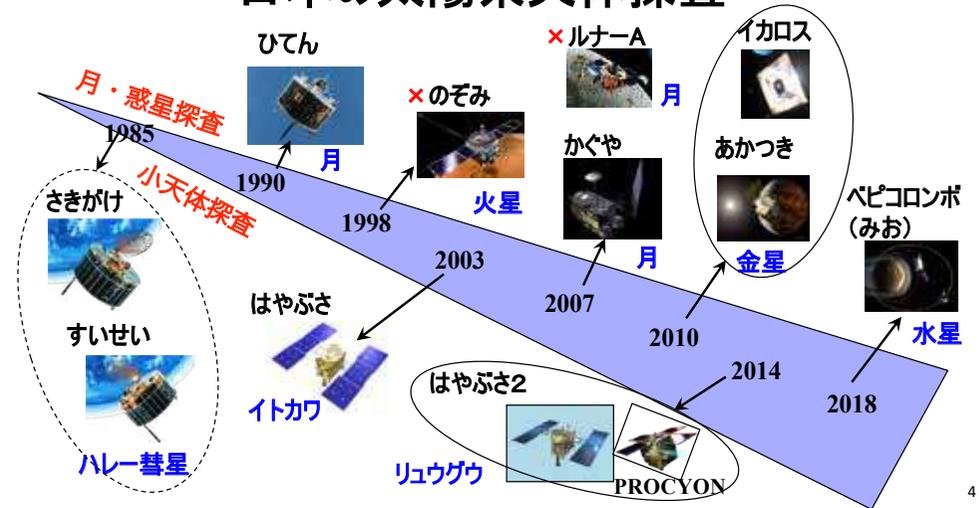
# 「はやぶさ2」の挑戦



2020年9月5日@友愛会館、東京

吉川真 (JAXA はやぶさ2プロジェクト)

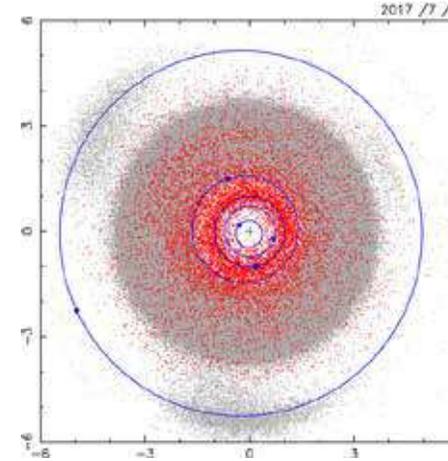
# 日本の太陽系天体探査



# 太陽系：惑星と準惑星



# 小惑星の分布と個数



現在 (2020年8月9日)、発見され軌道が求められている小惑星：  
963,408個

確定番号付き：  
546,077個

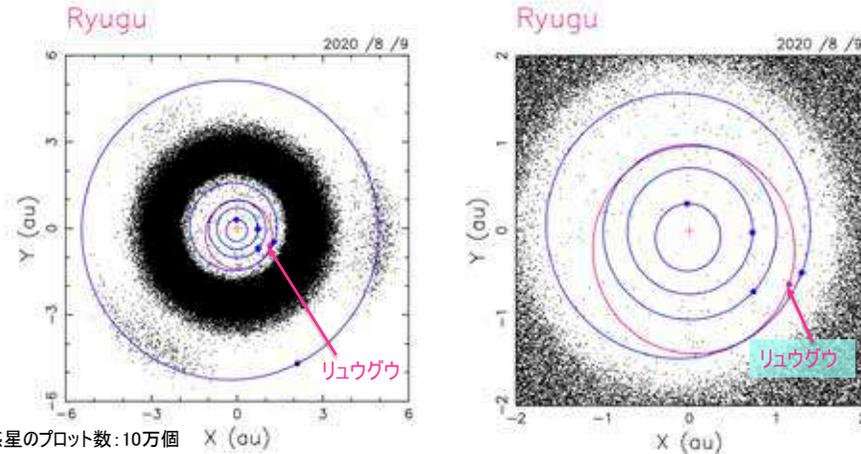
地球軌道に接近するもの (NEO : Near Earth Object) :  
23,260個

国際天文学連合 マイナープラネットセンターのWebより  
<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>

赤い点はNEOを示す

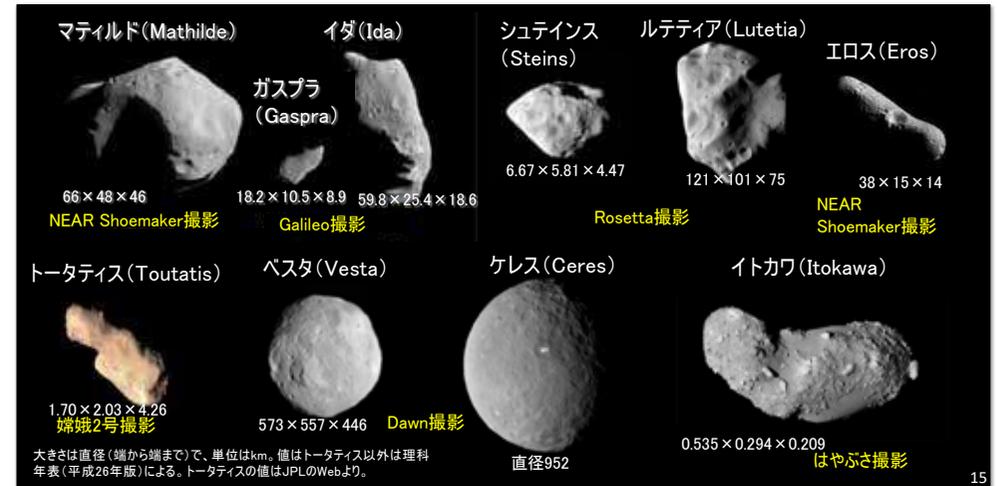
# 2020年8月9日のリュウグウの位置

「はやぶさ2」-リュウグウの距離: 約550万km



小惑星のプロット数: 10万個

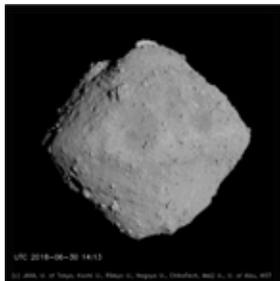
# 探査機が見た小惑星



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

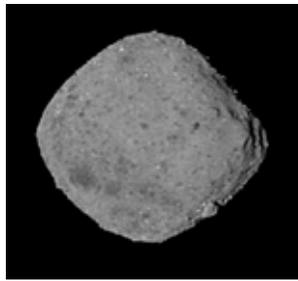
# 小惑星探査: 2018年以降の展開

リュウグウ  
(Ryugu)



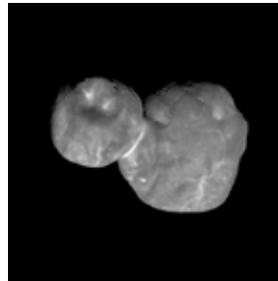
赤道直径: 約1000m  
はやぶさ2

ベヌー  
(Bennu)



赤道直径: 約500m  
オサイリス・レックス  
OSIRIS-REx

ウルティマ・トゥーレ(Ultima Thule)  
↓  
アロコス(Arrokoth)



直径19 kmと直径14 km  
ニュー・ホライズンズ

# 基本は「はやぶさ」

## 長い夢の実現

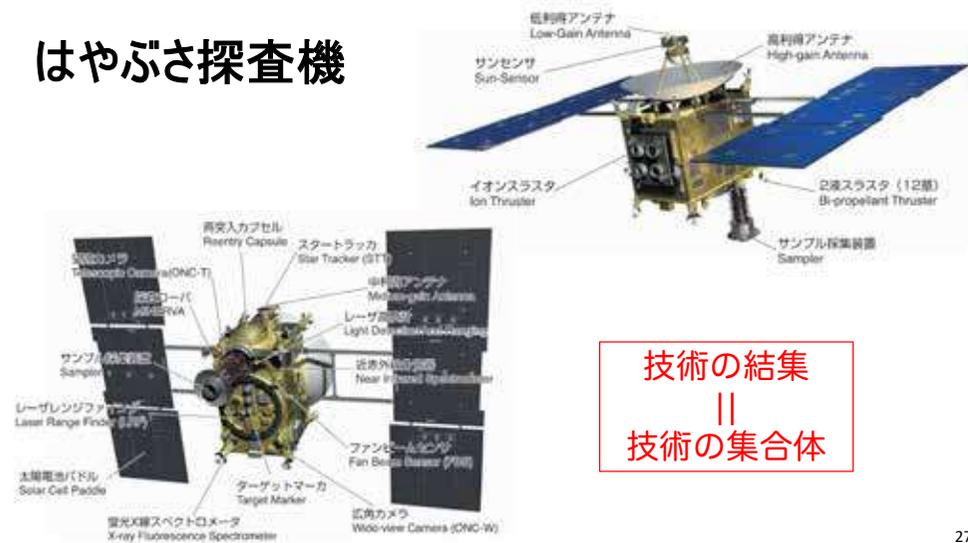
議論の始まり: 1985年頃 ..... 0年  
探査機の開発: 1996年頃 ..... 11年  
打ち上げ: 2003年5月 9日 ... 18年  
地球帰還: 2010年6月13日 ... 25年

## 世界初を目指す

- 月以外の天体に着陸してから地球に戻ってきた探査機は「はやぶさ」が初めて。
- そもそも、地球・月以外の太陽系天体から探査機が離陸したのは「はやぶさ」が初めて。
- 大きさがたった500mの天体に行くのは「はやぶさ」が初めて。
- 小惑星から物質を持ち帰るのは「はやぶさ」が初めて。
- 惑星間空間を飛行してきた探査機が、大気圏突入したのは「はやぶさ」が初めて。(ただしこれは、予定外)

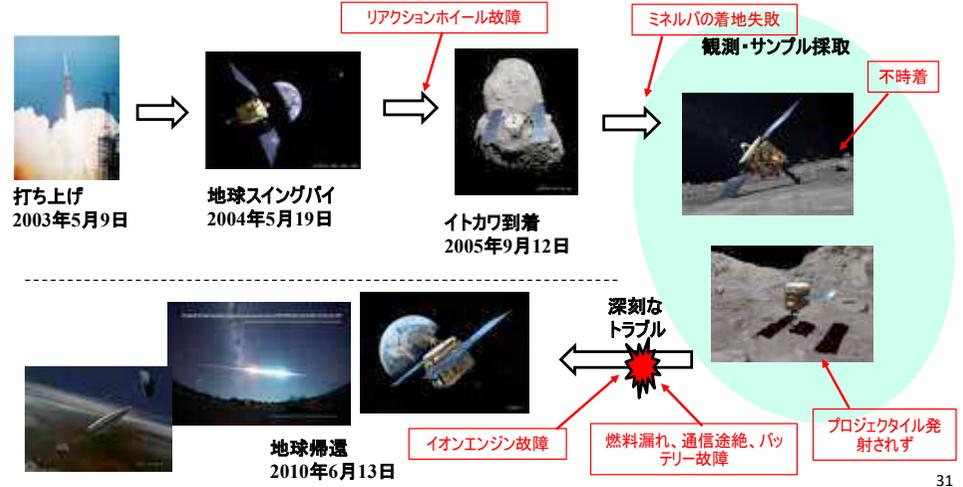


# はやぶさ探査機

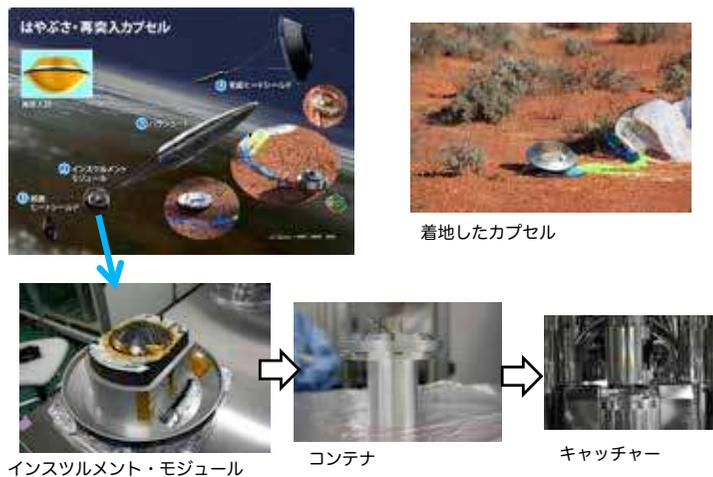


技術の結集  
||  
技術の集合体

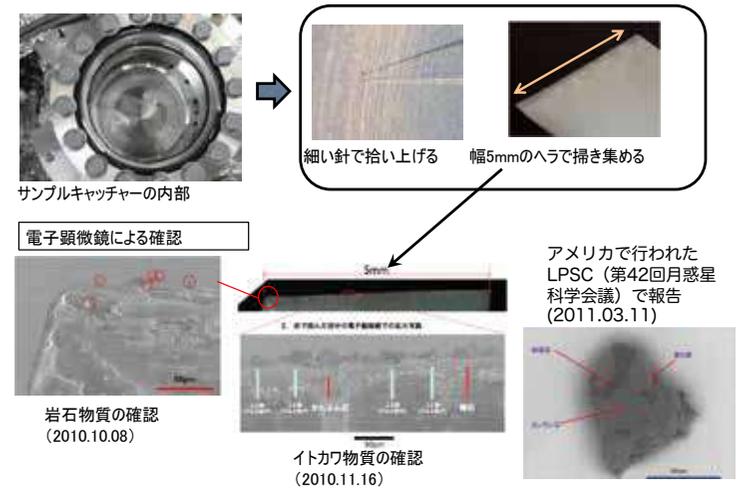
# 「はやぶさ」ミッション



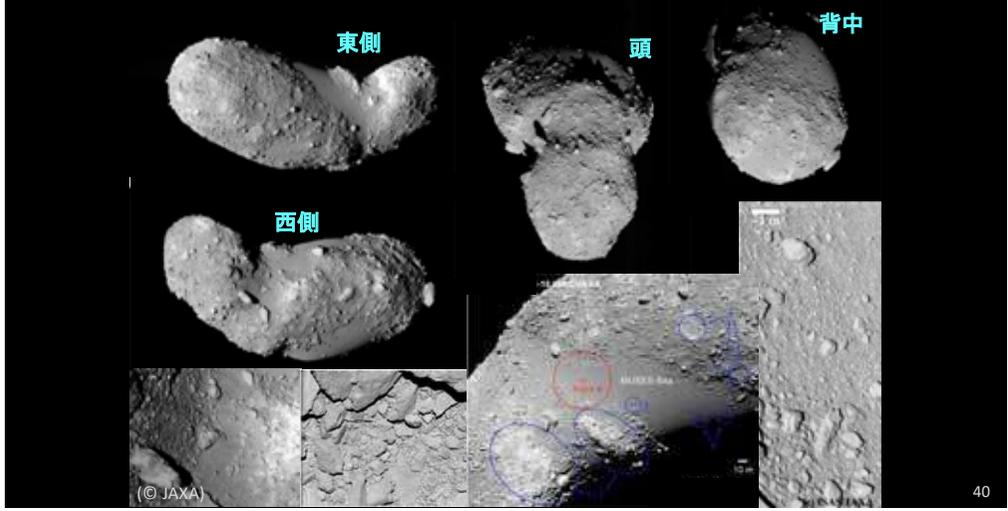
# 再突入カプセルの回収



# イトカワからの物質確認



# イトカワそのものが想定外



# 「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



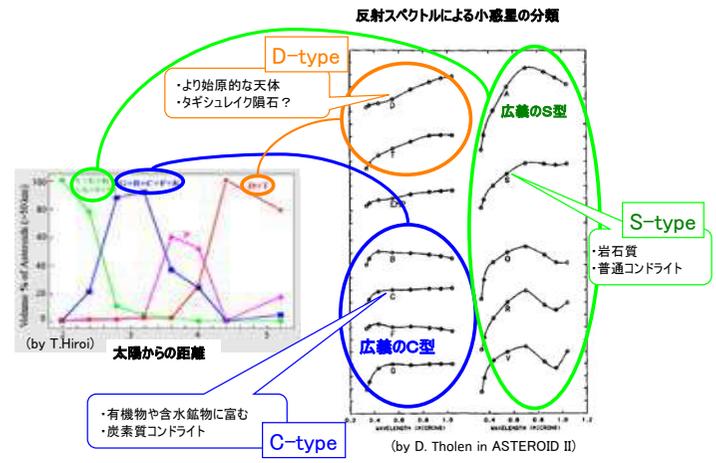
■太陽系の誕生と進化を解明する

- 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?

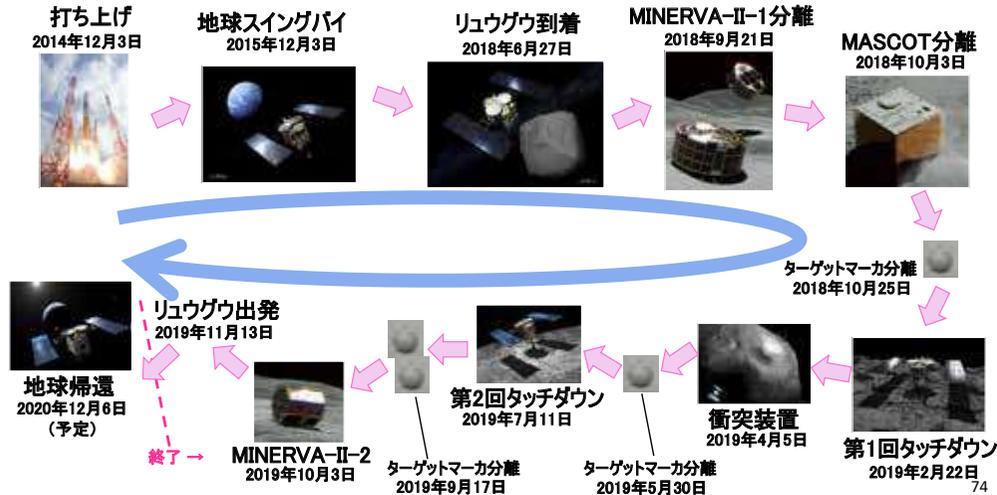
■隕石のキャリブレーション(校正)をする

- 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。

# 小惑星の分類と存在割合



# 「はやぶさ2」ミッションの流れ

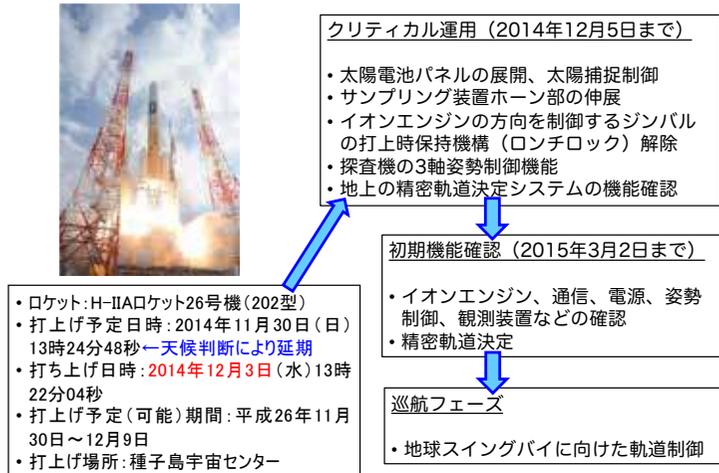


# 「はやぶさ2」探査機

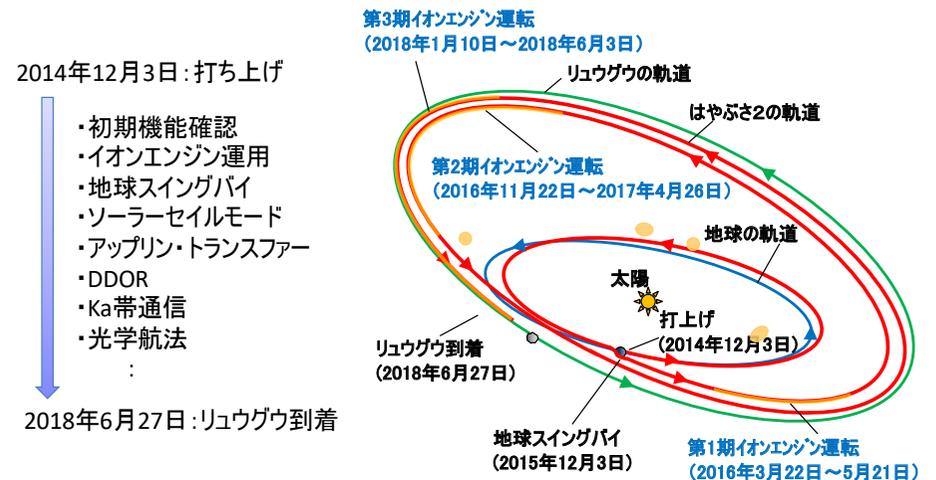


(画像クレジット: JAXA)

# 「はやぶさ2」打ち上げから巡航フェーズへ



# 打ち上げからリュウグウ到着までの軌道



# 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

87

# 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

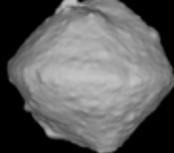
高度42mより  
2018年10月15日

(画像クレジット: ONC※)

88

# リュウグウの物理観測

形状模型



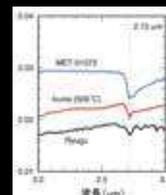
(画像クレジット: 形状※)

形状(LIDARによる)



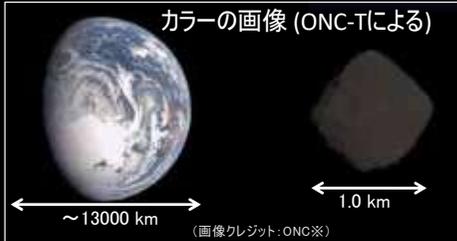
(画像クレジット: LIDAR※)

近赤外線  
スペクトル  
(NIRS3による)



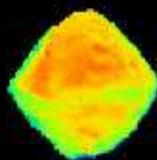
(画像クレジット: NIRS3※)

カラーの画像 (ONC-Tによる)

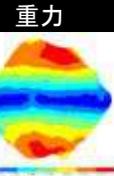


(画像クレジット: ONC※)

温度 (TIRによる)



(画像クレジット: TIR※)



重力

(画像クレジット: JAXA)

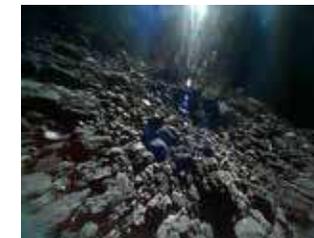
89

# MINERVA-II1運用

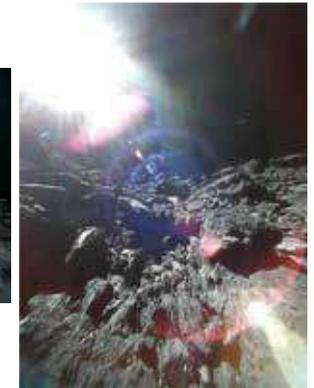
分離: 2018年9月21日



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



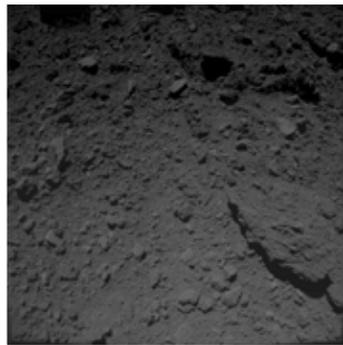
リュウグウ表面で見た太陽の動き  
2018年9月23日

(画像クレジット: JAXA)

90

# MASCOT運用

分離: 2018年10月3日

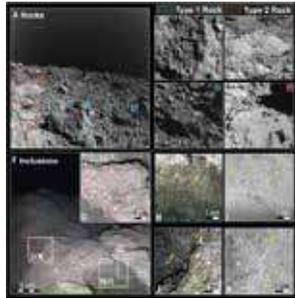


MASCOT分離  
2018年10月3日  
(画像クレジット: ONC※)



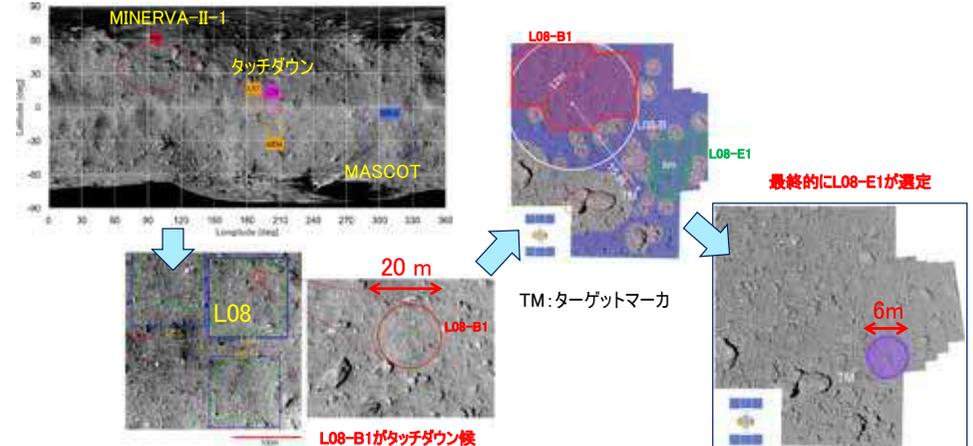
リュウグウ表面

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



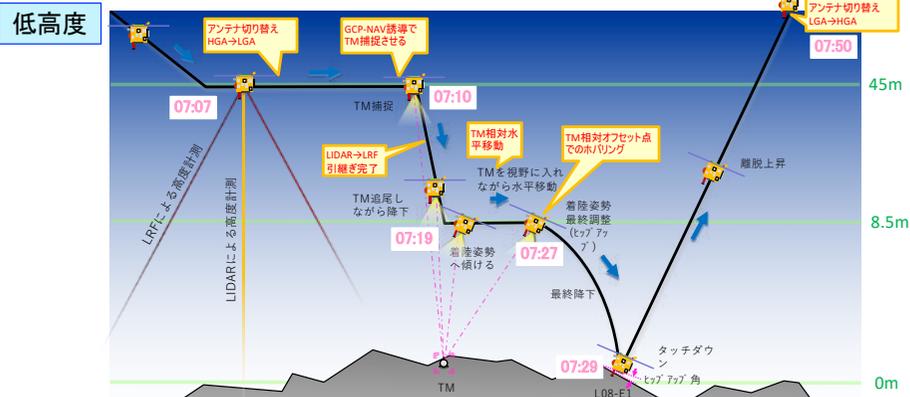
(画像クレジット: MASCOT/DLR/JAXA)

# 着地点選定



(画像クレジット: ONC※)

# 第1回タッチダウン運用

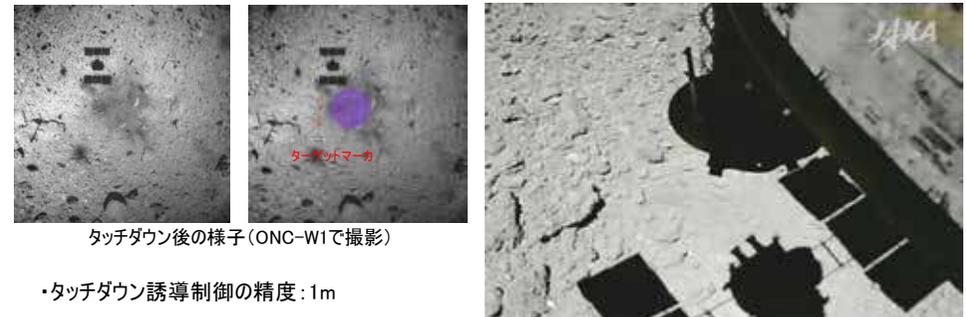


時刻は2019年2月22日  
の機上、日本時間

(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)

(画像クレジット: ONC※)

## 衝突装置 (SCI) 運用

分離: 2019年4月5日

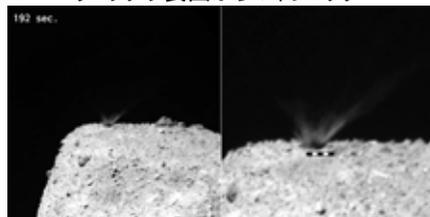
分離された衝突装置 (SCI)



ONC-W1で  
撮影  
(画像クレジット: ONC※)



リュウグウ表面からのイジェクタ



スケールは25m



TIRで  
撮影

(画像クレジット: TIR※)

©Arakawa et al.,  
Science 2020



103

## 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



(画像クレジット: ONC※)

SCI衝突後 2019/04/25



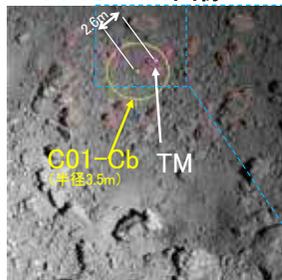
前後の比較 (ブリンク画像)



104

## 第2回タッチダウン地点付近のようす

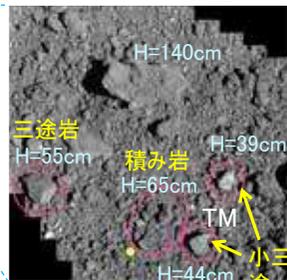
PPTD-TM1画像



TM=ターゲットマーカ

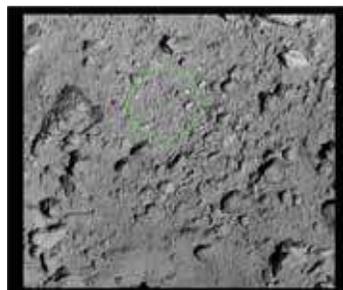
(画像クレジット: ONC※)

PPTD-TM1B画像



C01-Cb 中心

Hは推定された高さの最大値(最も高い推定値)  
※岩の名称はニックネームであり、正式な名称ではない。



タッチダウン候補地点付近のDEM (Digital Elevation Map)

(画像クレジット: ONC-SCI※)

124

## 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)

130

## 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ブラホーン接地点

第2回タッチダウン精度



サンブラホーン接地点

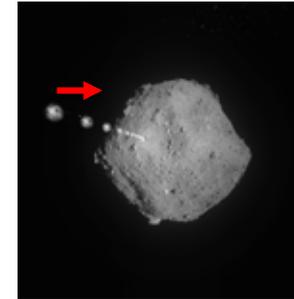


(画像のクレジット: JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研)

131

## ターゲットマーカ分離運用

ターゲットマーカEの分離  
(分離時刻: 2019/9/17 01:17JST)



ターゲットマーカCの分離  
(分離時刻: 2019/9/17 01:24JST)



高度約1kmで分離。4秒毎の連続画像(約1分)を重ね合わせて表示したもの。探査機が11cm/sで上昇しながら撮影。ターゲットマーカは、横方向に約12cm/sで分離(およその分離の方向は赤い矢印で示す)。降下速度はほぼゼロであるが、探査機が上昇しながら撮像したので、ターゲットマーカが小さくなっていくように見える。

(画像のクレジット: JAXA、千葉工大、東京大、高知大、立教大、名古屋大、明治大、会津大、産総研)

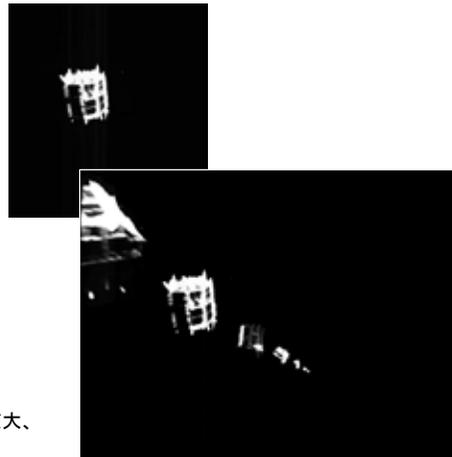
2019/09/24

「はやぶさ2」記者説明会

138

## MINERVA-II2(ローバ2)分離運用

- 分離開時刻: 2019年10月3日、00:57 (日本時間、機上)
- リュウグウから約1kmの高度で分離→周回
- 分離直後に広角の光学航法カメラ(ONC-W2)で撮影
- MINERVA-II2からの電波も受信

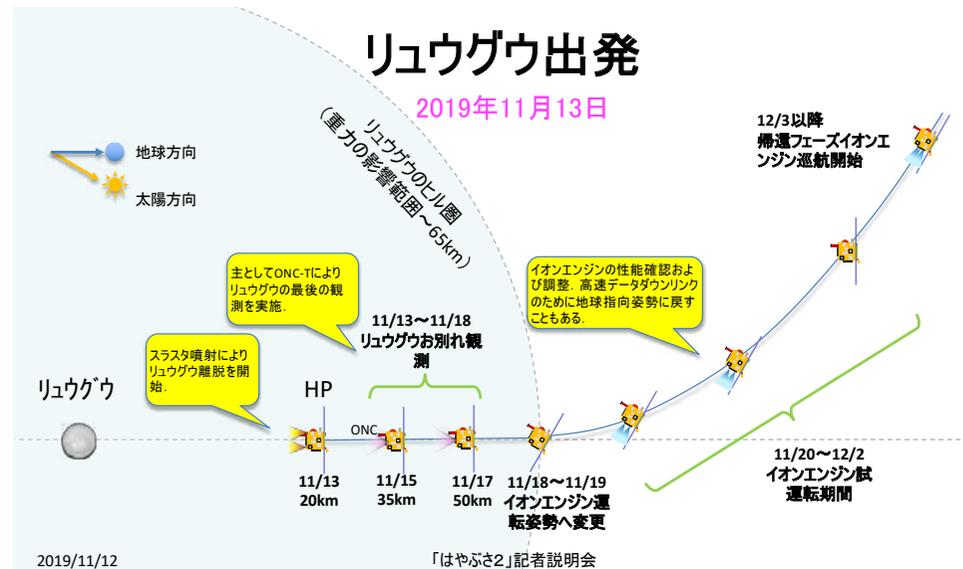


(画像クレジット: JAXA、千葉工大、産総研、立教大、東京大、高知大、名古屋大、明治大、会津大)

142

## リュウグウ出発

2019年11月13日

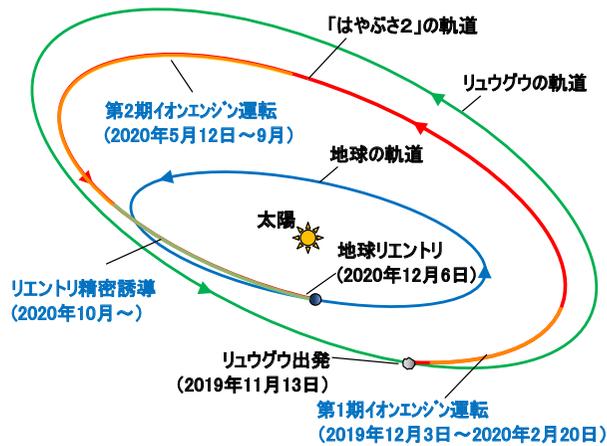


2019/11/12

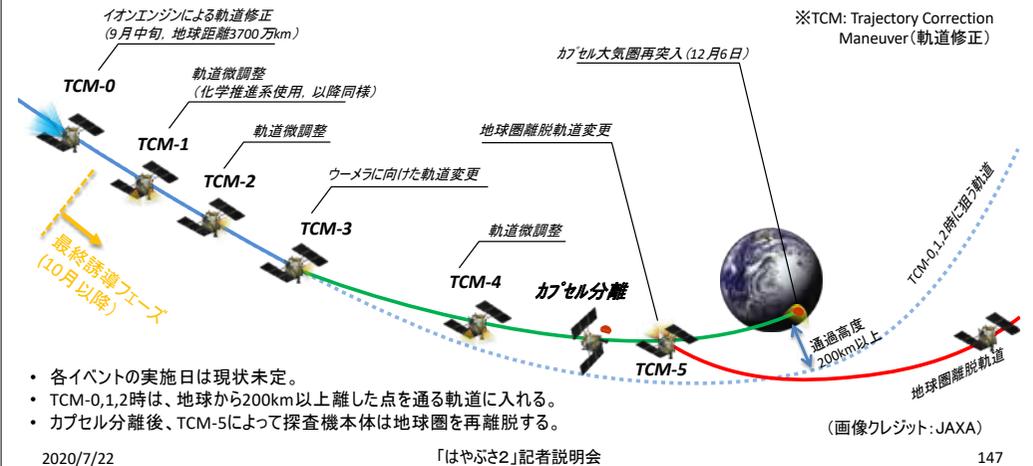
「はやぶさ2」記者説明会

143

# リュウグウ出発から地球帰還までの軌道



# 地球帰還最終誘導フェーズ



# 再突入カプセル回収計画

- 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)

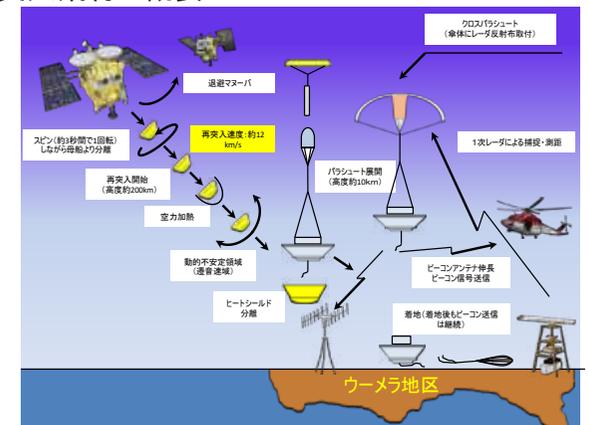
# 再突入カプセル回収計画

## 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

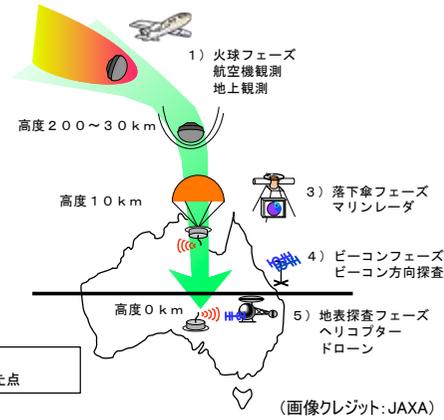
(画像クレジット: JAXA)



# 再突入カプセル回収計画

## 回収オペレーションの概要

- 探索(火球フェーズ)
  - 光学観測(地上)
    - 光跡を数局で計測(三角測量の原理)
  - 光学観測(航空機)
    - 光跡を雲上から計測(天候の影響を受けない)
- 探索(落下傘フェーズ)
  - 方向探索(ビーコン)
    - ビーコンを計5局\*1で受信(三角測量の原理)
  - 方向探索(マリナーレーダ)\*2
    - 方向と距離を計測可。
- 探索(地表探査フェーズ)
  - 方向探索(ヘリコプター)
    - 着地後のビーコンをヘリコプターで探査
  - ドローン\*2
    - 上空から空撮。画像解析で識別。
- 輸送
  - 安全化処理、分解
  - カプセル内のガス採取\*2、輸送(日本へ)



# 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 JU<sub>3</sub> ※1999年5月に発見された小惑星

小惑星Ryuguの軌道



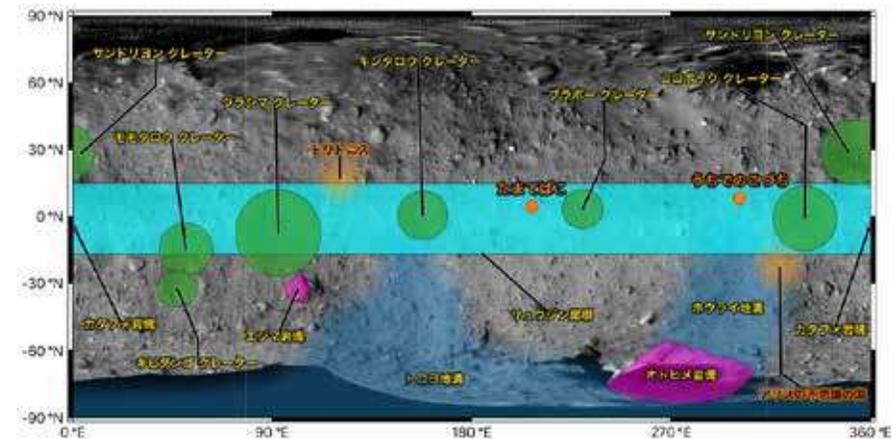
- コマ(独楽)型、円形の赤道形状
- 半径: 平均 約450 m (赤道半径 約500 m、極半径約440 m)
- 質量: 約4.5億トン ( $4.50 \times 10^{11}$  kg、 $GM$ -約30  $\text{m}^3\text{s}^{-2}$ )※
- 体積: 0.377 $\text{km}^3$  (※赤道での重力は地球の約8万分の1、イトカワの数倍の重力となる)
- 密度: 1.19 $\text{g}/\text{cm}^3 \rightarrow$  Porosity は50%以上
- 自転軸の向き:  $(\lambda, \beta) = (180^\circ, -87^\circ)$
- 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(少し赤みがかった)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



# リュウグウについて分かったこと

- リュウグウはラブルパイル天体(空隙率50%以上)
- 衝突破砕によって作られた破片が再集積して誕生
- 過去の自転周期は3.5時間程度であった可能性が高い(現在は7.6時間)
- 赤道リッジ付近には新鮮な物質が露出
- 2.72 $\mu\text{m}$ の微弱な吸収あり=含水鉱物
- 内部加熱ないし衝突加熱を受けた天体が元の物質
- 小惑星帯内側のポラナ族ないしオイラリア族がリュウグウの母天体の起源である可能性(14億年ないし8億年前に衝突・再集積しリュウグウの直接の母天体となる)

# リュウグウ表面の地名



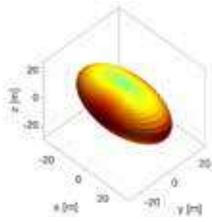
注: トリトニス(MINERVA-II1の着陸地)、アリスの不思議の国(MASCOT着陸地)、たまてばこ(1回目のタッチダウン地点)、うちでのこづち(2回目タッチダウン地点)はニックネーム(愛称)で、国際天文学連合(IAU)に認められた地名ではない。他の地名はIAUで認められた正式名称である。

# 拡張ミッション(案)

## 2つの候補天体について

<2001 AV43の物理特性>

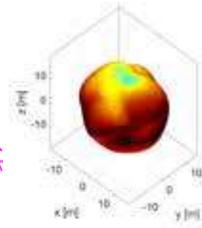
<1998 KY26の物理特性>



- ・小さい(30~40m)
  - ・高速自転(自転周期 10分程度)
- ↓
- ラブルパイルなのか、1枚岩なのか?

2029年11月11日に、地球に約30万kmまで接近 ←この接近のタイミングで「はやぶさ2」がランデブーする

C型小惑星の可能性があり、リュウグウやベヌーとの比較が興味深い



形状	細長い、アスペクト比:約0.5(変光観測より)
平均直径	約40 m程度
自転周期	10.2 min (0.17hr)
タンブリング運動	短期時間変化は確認されず
スペクトル型	S型の可能性、断定できず

形状	球状(レーダ観測より)
平均直径	約30 m程度
自転周期	10.7 min (0.178hr)
タンブリング運動	短期時間変化は確認されず
スペクトル型	炭素質小惑星の可能性あり

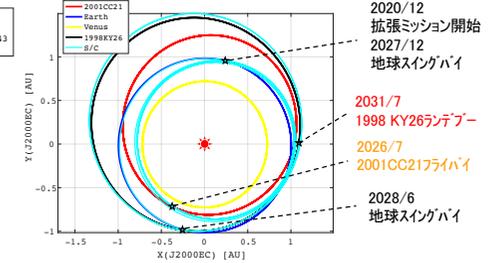
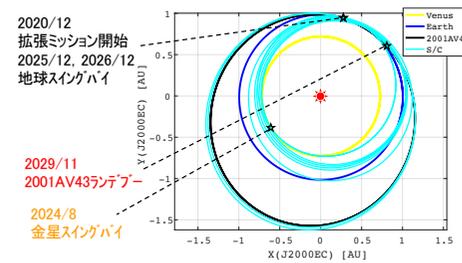
(画像クレジット: Auburn University, JAXA)

# 拡張ミッション(案)

- ・ 2001 AV43 および 1998 KY26へのミッション計画を作成した。
- ・ 最終的にはこれら2つから1つを選ぶ。

EVVEEAシナリオ 総加速度量 1.25km/s  
(Earth->Venus->Earth->Earth->Asteroid)

EAEAAシナリオ 総加速度量 1.19km/s  
(Earth->Asteroid->Earth->Earth->Asteroid)



(画像クレジット: JAXA)

# 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?



???

# 小天体探査の意義

