

小惑星探査機 はやぶさ 2

— 探査機の構造と期待される成果 —

2019年6月15日

日本山岳会 山の自然学研究会

西田 進

私と宇宙開発

宇宙航空研究開発機構JAXAの前身の1つ、宇宙開発事業団で人工衛星の開発に従事

私に関係した人工衛星

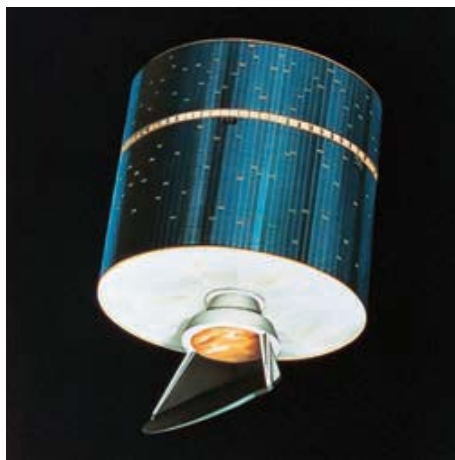
実験用放送衛星



1978年打上げ

NHKの衛星放送の先駆け、
NHK・民放のBSに発展した

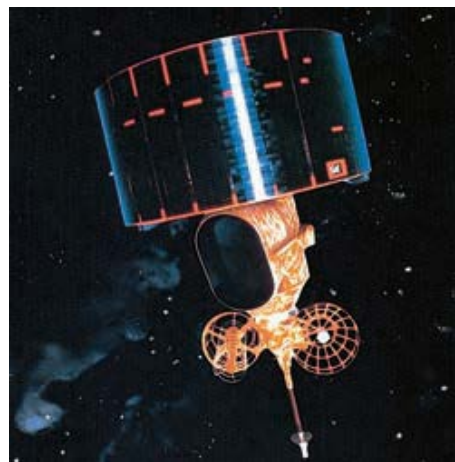
実験用通信衛星



1977年打上げ

NTTの非常災害時通信、離
島通信などに利用された

気象衛星



1977年打上げ

「ひまわり」の愛称で呼ばれ
れる気象衛星の先駆け

技術試験衛星



1982年打上げ

国産技術で開発された
我国最初の3軸制御衛星

目 次

1. はやぶさ 2 のミッション
2. はやぶさ 2 の諸元
3. はやぶさ 2 の構造
4. はやぶさ 2 の運用
5. 世界の打上げ機(参考)

「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較

はやぶさ



2003年5月9日打上げ
小惑星イトカワ(S型)を探索した

「はやぶさ」は世界で初めて小惑星からその表面物質を持ち帰ることに成功した。幾たびかのトラブルに見舞われたが、克服した。

はやぶさ 2



2014年12月3日打上げ
小惑星リュウグウ(C型)を探索中

「はやぶさ2」には、様々な改良が加えられている。
小惑星表面に人工的なクレーターを作り、地下のサンプルを持ち帰るといった、新しい技術にも挑戦する。

小惑星とは

その多くは火星と木星の間の軌道を公転している。この領域を小惑星帯と呼ぶ。
小惑星の起源は諸説あるが、よく分らないという。

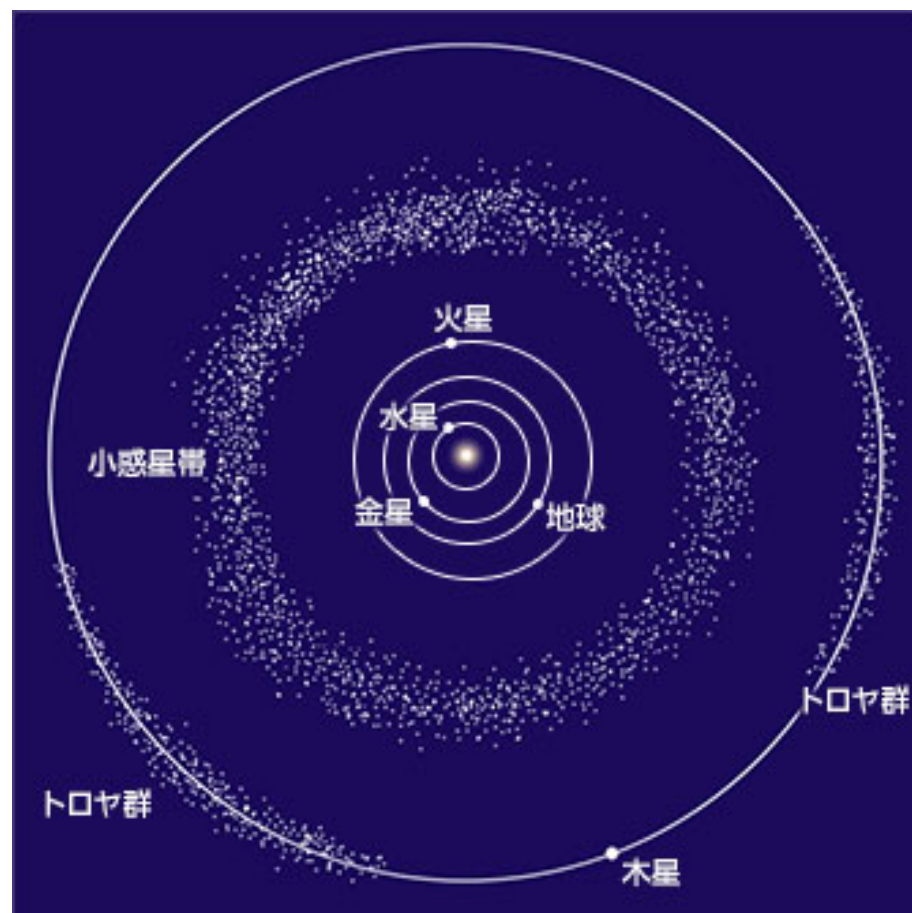
大きな小惑星の例：ケレス $975 \times 975 \times 909$ km
イトカワ： $535 \times 294 \times 209$ m リュウグウ：直径700 m

「イトカワ」も「リュウグウ」も小惑星帯
やトロヤ群ではなく、地球近傍小惑星
のグループの1つ

小惑星の数：2012年5月現在、軌道が確定して
小惑星番号が付けられた天体は 329,243個

スペクトルによる分類

- ① C型小惑星 - 炭素質
発見されている小惑星の75%がこれ
(例) はやぶさ2が探査中のリュウグウ
- ② S型小惑星 - ケイ素質
発見されている小惑星の17%がこれ
(例) はやぶさが探査したイトカワ
- ③ M型小惑星 - 金属質
ニッケルと鉄が主成分



「はやぶさ」と「はやぶさ2」の探査対象の比較

「はやぶさ」が探査した
イトカワは、S型小惑星

ケイ酸鉄やケイ酸マグネシウムなどの石質の物質を主成分とする小惑星であり、既知の小惑星の約17%を占める。

S型小惑星は、主に火星と木星の間にある小惑星帯の中央より内側に多く分布している。

S型小惑星は、地球上で最もたくさん発見されている隕石である「普通コンドライト」のふるさとではないかと予想されていたが、「はやぶさ」が持ち帰った物質を分析したところ、S型小惑星が普通コンドライトの母天体であることが証明された。

「はやぶさ2」が探査する
リュウグウは、C型小惑星

炭素系の物質を主成分とする小惑星であり、既知の小惑星の約75パーセントを占める。

C型小惑星は小惑星帯の中程に多く分布している。

C型小惑星は、「炭素質コンドライト」と呼ばれる隕石のふるさとであると予想されている。C型小惑星は、有機物(炭素を含む化合物)や水を多く含む天体と考えられている。炭素と水は、地球上の生物の最も基本的な要素であり、地球生命の原材料ともいえる。

「はやぶさ2」 小惑星リュウグウに 太古の水を発見

2019年3月20日 朝日新聞

小惑星リュウグウに太古の「水」

「はやぶさ2」観測 水の起源 解明に迫る



宇宙航空研究開発機構（JAXA）などは、地球から約3億キロ離れた小惑星「リュウグウ」の地表から太古の水成分を発見した。探査機「はやぶさ2」による成果で、生命に欠かせない水の起源の解明につながるという。論文は20日、米科学誌サイエンスに掲載される。

JAXAによると、はやぶさ2が昨年6月以降、地表からの赤外線を観測し、酸素と水素の原子が結びつ

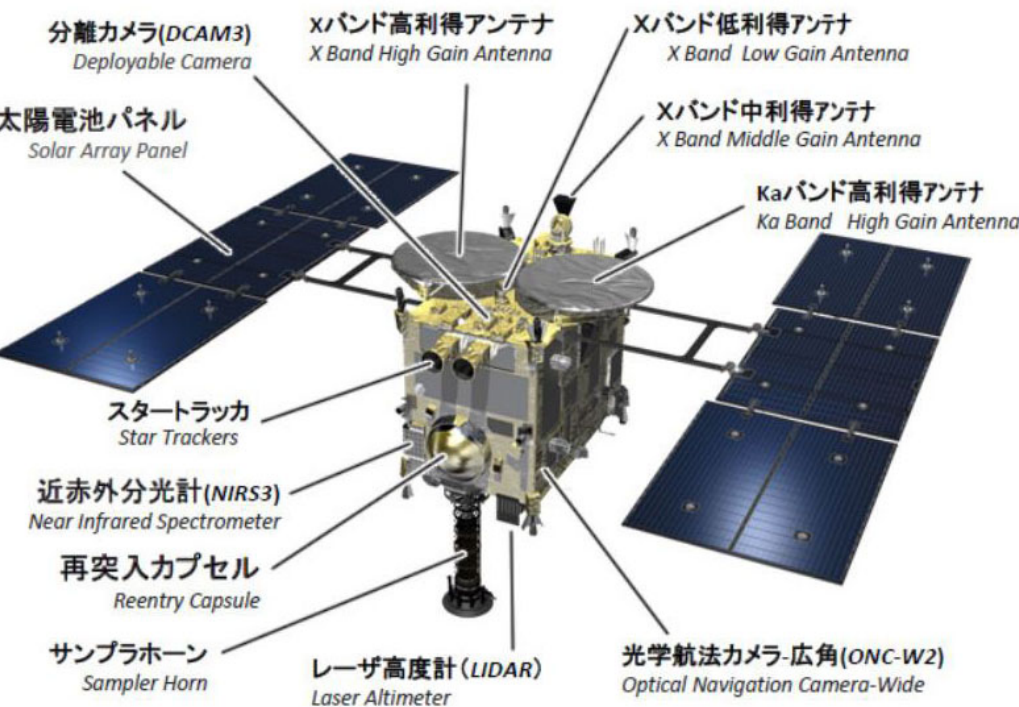
いた水酸基（OH）の存在を示す波長を捉えた。リュウグウの「親」にあたる46億年前に生まれた天体にあった液体の水の「名残」だ。リュウグウの軌道や構成する岩石の特徴から、「親」の天体は火星と木星の間にある小惑星「ボラナ」（直径55キロ）か「オイラリア」（直径37キロ）のどちらかと判明。14億年前か8億年前、ほかの天体と衝突して飛び散った岩石が再び集ま

るなど衝突を繰り返して、現在のリュウグウの姿になったと考えられるという。こうした小惑星が地球に衝突し、水や有機物がもたらされたという説がある。研究チームの杉田精司・東京大教授（惑星科学）は「リュウグウの試料を持ち帰って分析すれば、小惑星がかつて地球にもたらした水の経緯や量、有機物の種類がわかるかもしれない」と話している。（石倉徹也）

2. はやぶさ 2 の諸元

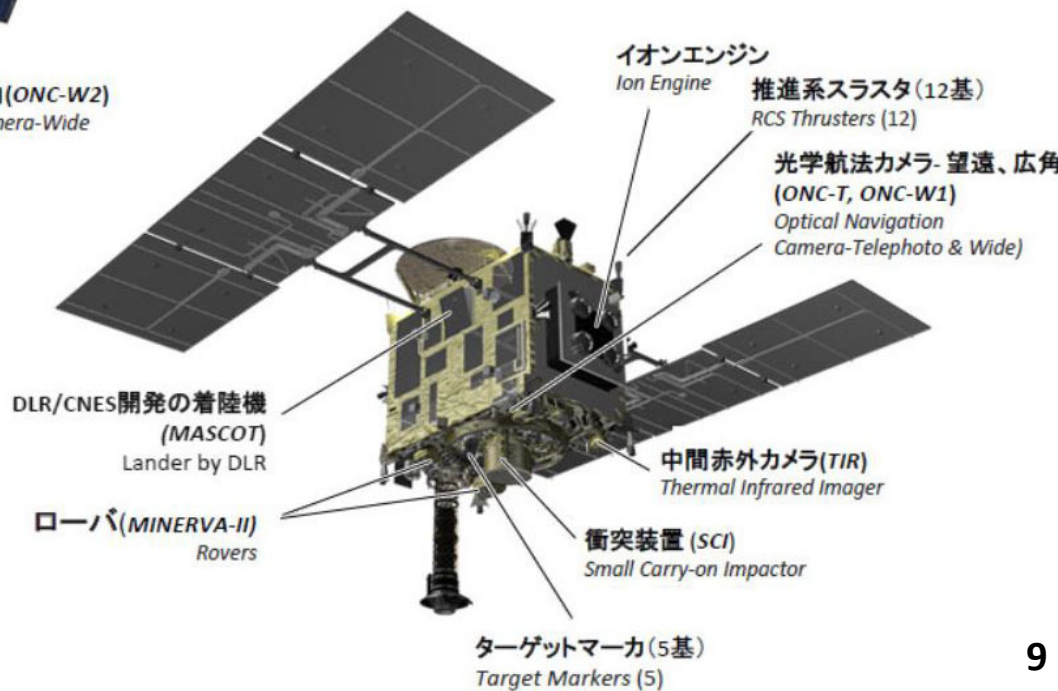
質量	約600kg
打ち上げ	2014年12月3日13時22分(H - IIA ロケット 26号機)
軌道	小惑星往復
小惑星到着	2018年6月27日9時35分 打ち上げから1302日目
小惑星出発	2019年11月～12月
小惑星滞在期間	約18ヶ月
地球帰還	2020年
探査対象天体	小惑星 リュウグウ
主要搭載機器	サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、 レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、 衝突装置、小型ローバ

3. はやぶさ 2 の構造

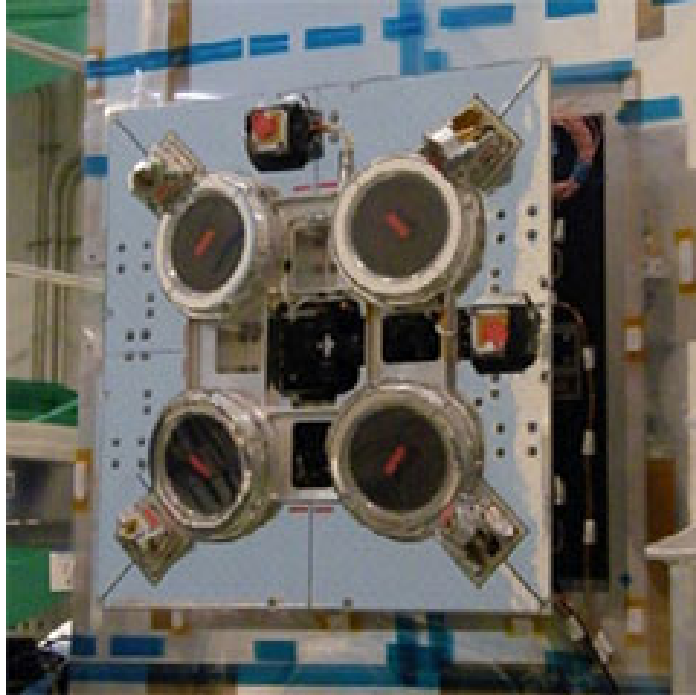


上から見下ろす

下から見上げる



電気推進系(イオンエンジン)



地球から小惑星、また小惑星から地球へ航行するときの軌道変更に使う。

イオンエンジンは、地球と小惑星との往復航行を、化学推進の10分の1という少ない推進剤の消費で可能にする。

1台当たりの最大推力10mN(ミリニュートン)

(10mN とは、地球上で約1グラム重の力という僅かな力である)



真空チャンバーの中で運転中のイオンエンジン
フライトモデル

口径10cmのイオン源の855個の小さな穴から
秒速47kmで噴射されるキセノンイオンビーム
(左から右上方向)と中和器プラズマ(イオン源
の左上)の発光。

化学推進系

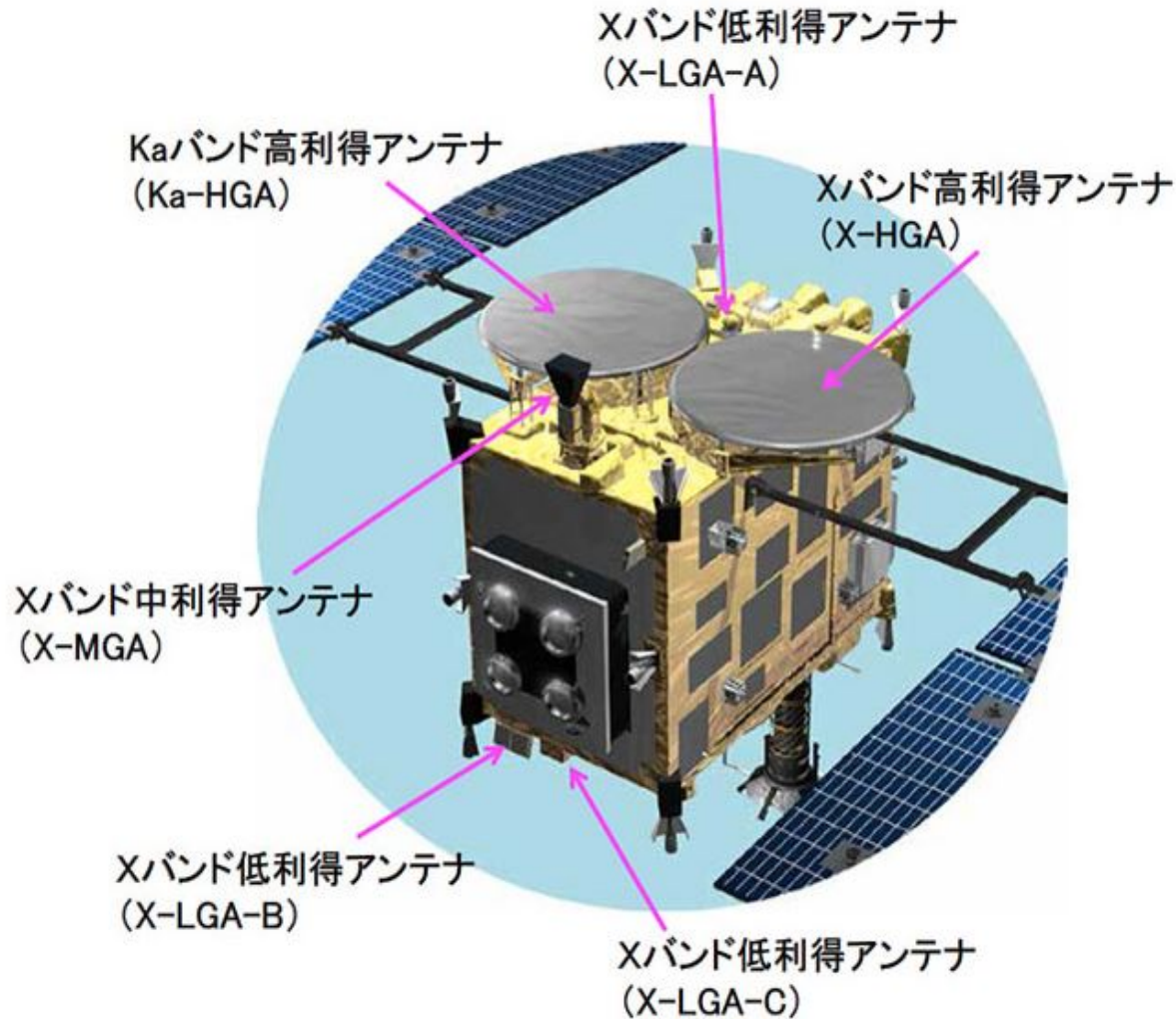


姿勢制御や軌道の微修正、小惑星滞在時の軌道制御に使う小型のスラスタ。

「はやぶさ2」の化学推進は「はやぶさ」同様に燃料と酸化剤を用いる2液式で、20 N(ニュートン)の推力を出すスラスタが12基搭載されています。

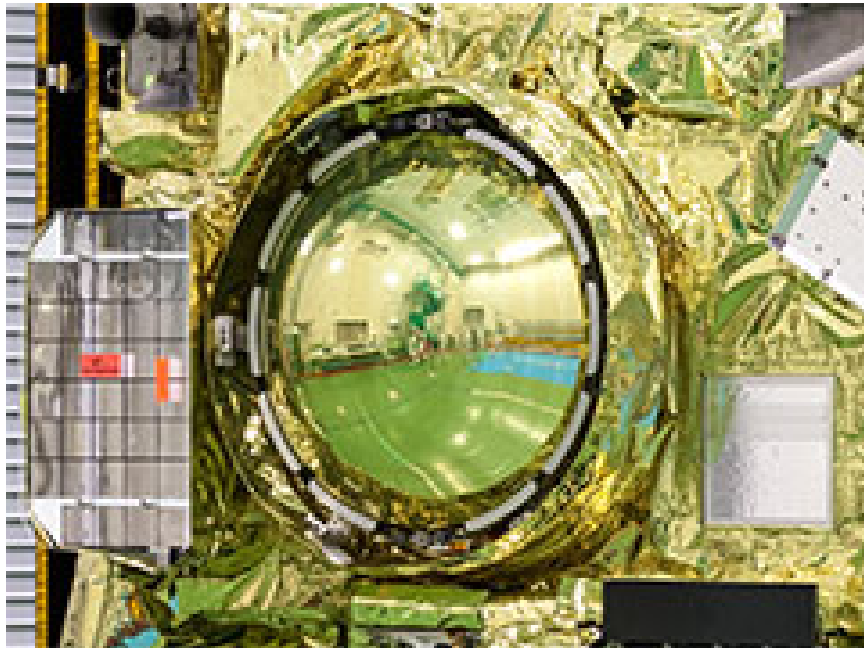
(20 Nとは、地球上で約2kg重の力である)

通信系(アンテナ)

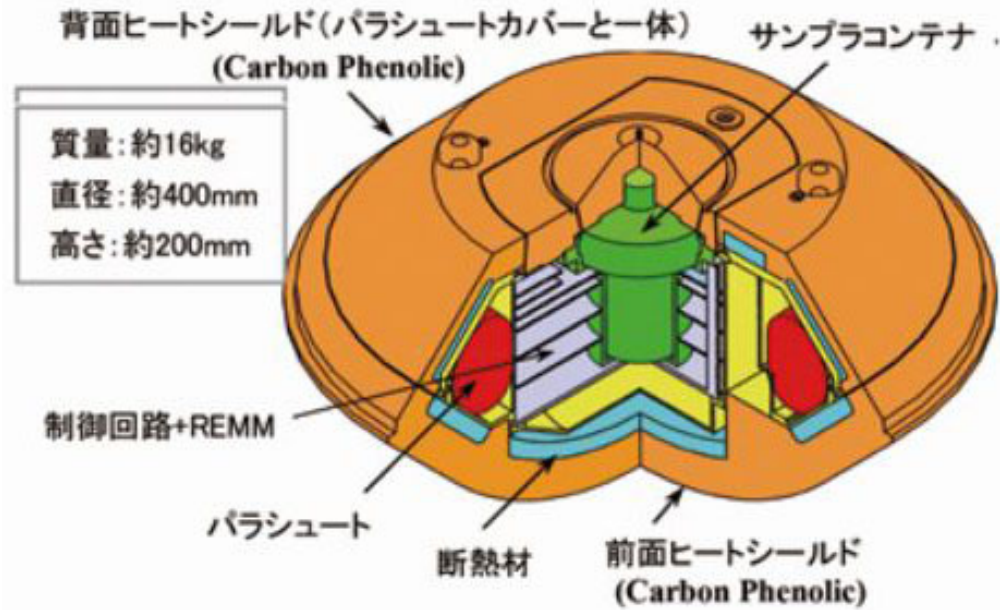


はやぶさ2は、2つの丸い平面アンテナ(高利得(ハイゲイン)アンテナ)のほか、中利得(ミドルゲイン)アンテナと低利得(ローゲイン)アンテナがある。

再突入カプセル



はやぶさ2のミッションの一番最後に、小惑星のサンプルを封入したコンテナを内部に搭載したカプセルが、秒速12kmで地球大気に再突入し、地上で回収される。



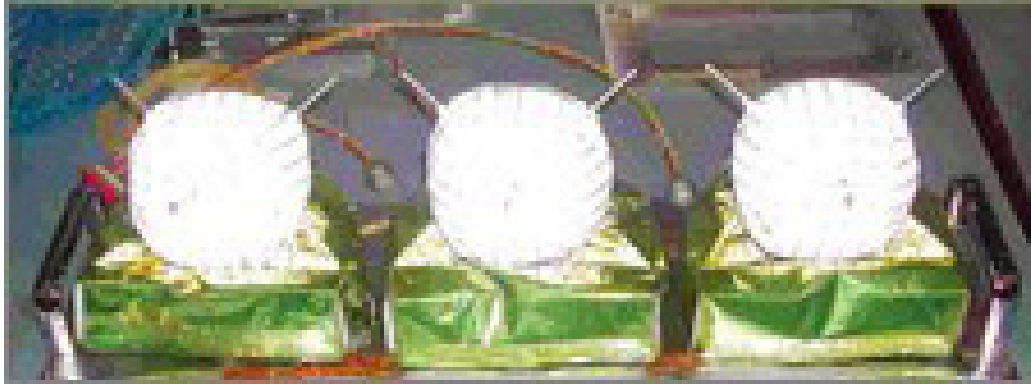
はやぶさ2の再突入カプセルの構造

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。
「はやぶさ2」ではターゲットマーカを5個搭載。
内部に沢山の方々の名前を刻んだ薄いシートが入っている。



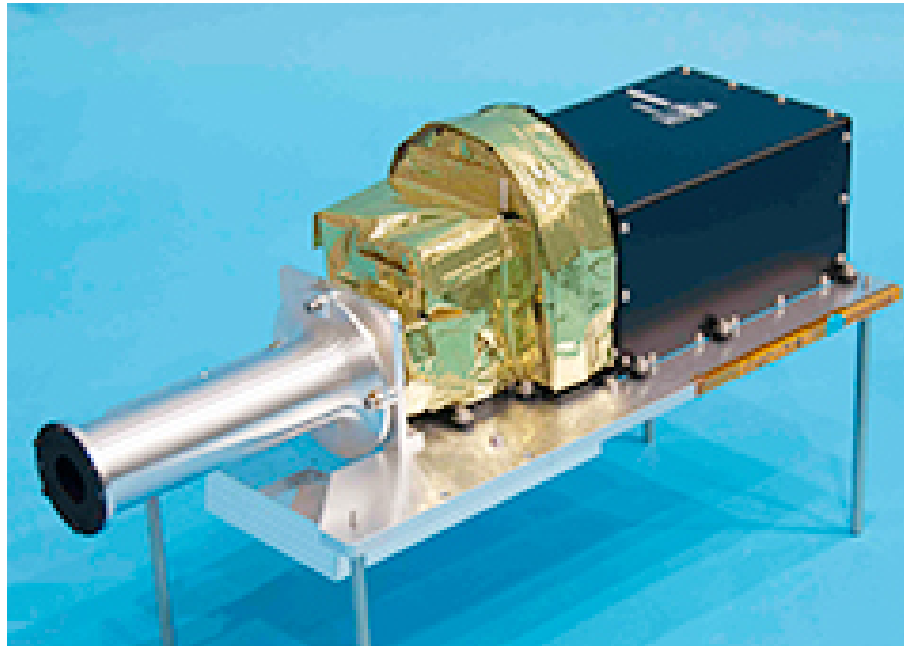
ターゲットマーカにフラッシュをあてない時(上)の画像



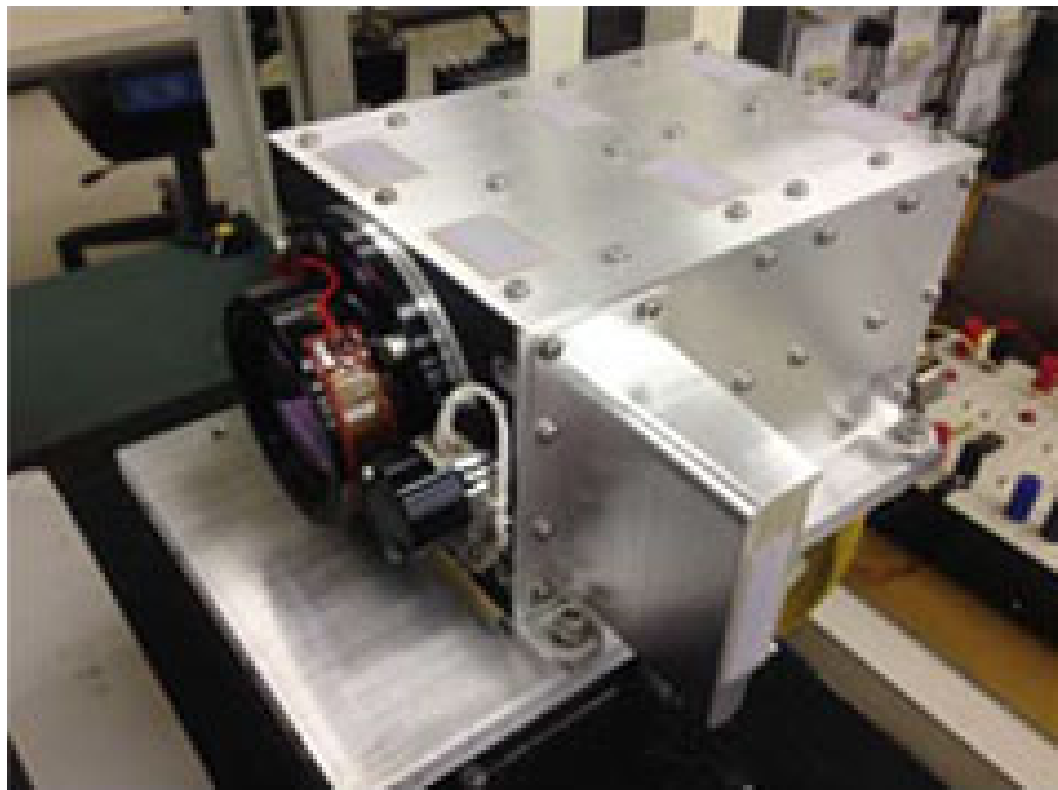
ターゲットマーカにフラッシュをあてた時(下)の画像

光学航法カメラ

3つのカメラ(望遠+広角2つ)で、科学観測と探査機の航法(ナビゲーション)を行なう。

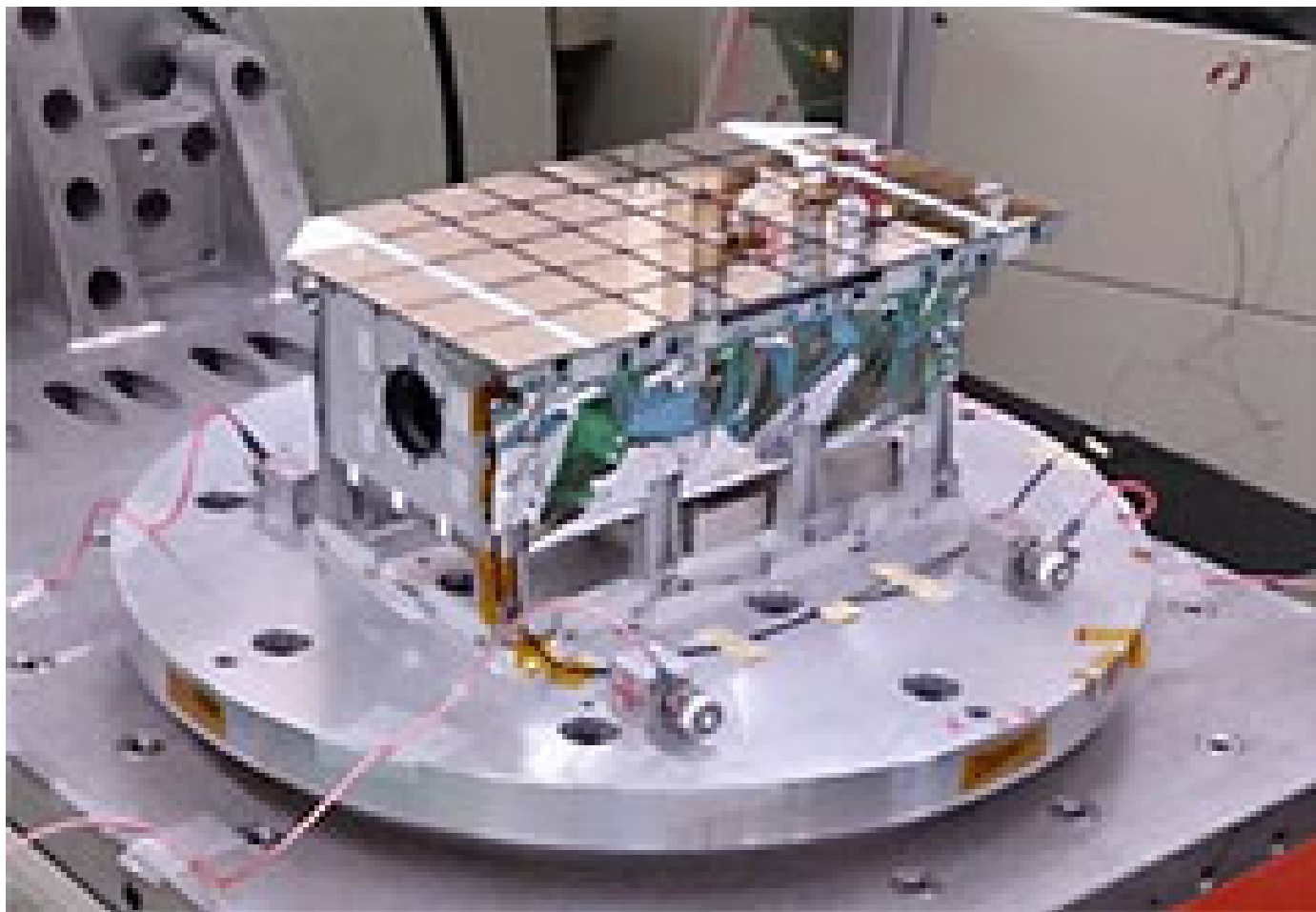


中間赤外カメラ



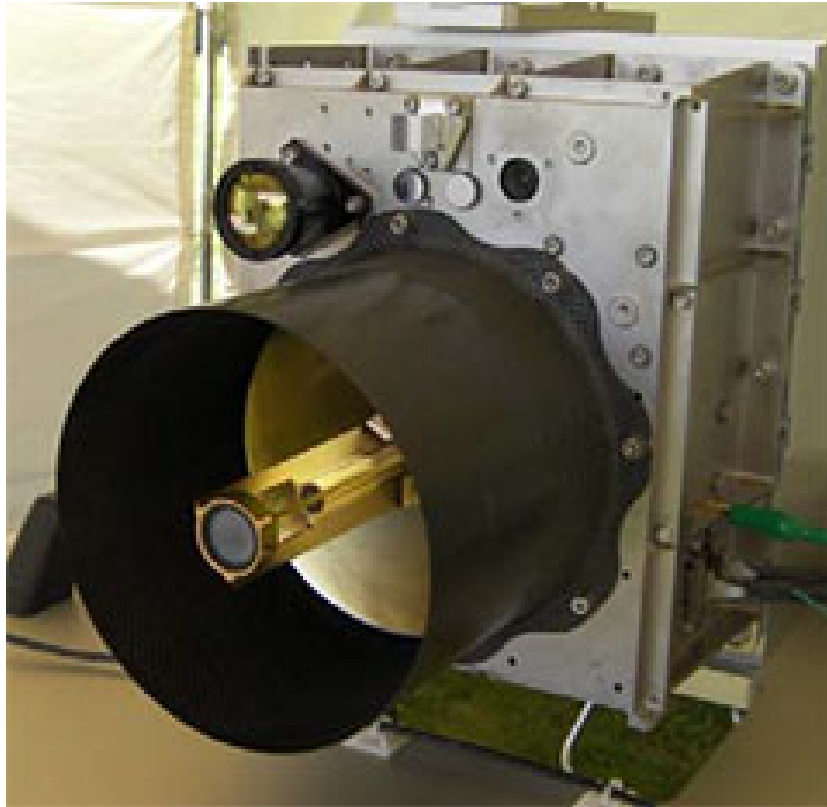
10ミクロン帯を含む中間赤外線で小惑星を撮像する。
小惑星の表面温度は、太陽に照らされる昼間は上昇し、夜間は低下するという日変化(にちへんか)をする。砂のように細粒の土質・すきまが多い岩石では表面温度の日変化は大きくなり、中身の詰まった岩石は日変化が小さくなる。小惑星からの熱放射を撮像することにより、小惑星表面の物理状態を調べる。

近赤外分光計



この機器は、小惑星からの赤外線（波長3ミクロン）の反射を観測し、含水鉱物の分布を調べる。

レーザ高度計

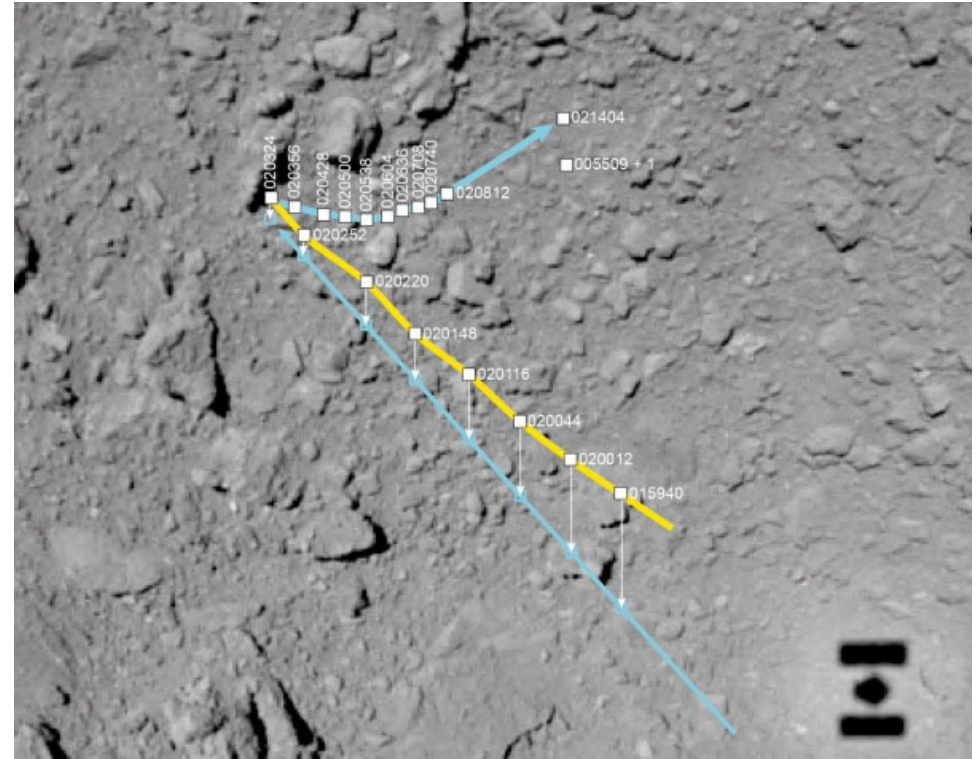


探査機と小惑星表面との間の距離を計測する。
計測範囲は数10m～数10km

小型着陸機(MASCOT)



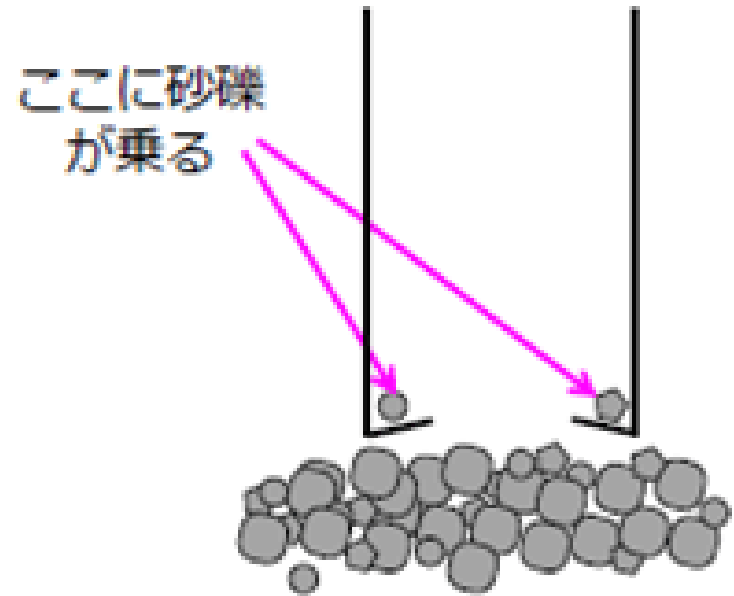
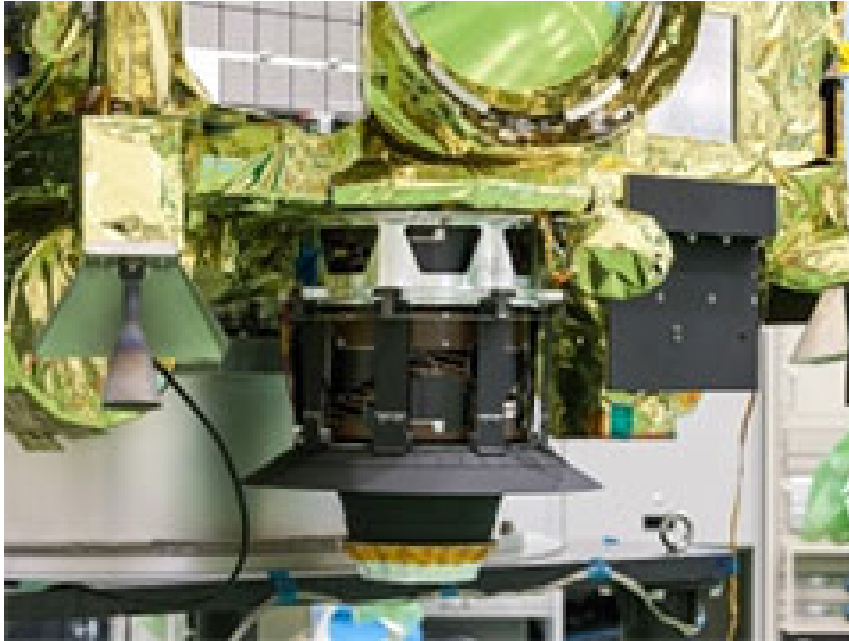
小型着陸機MASCOT



はやぶさ2から撮影したMASCOTの軌跡

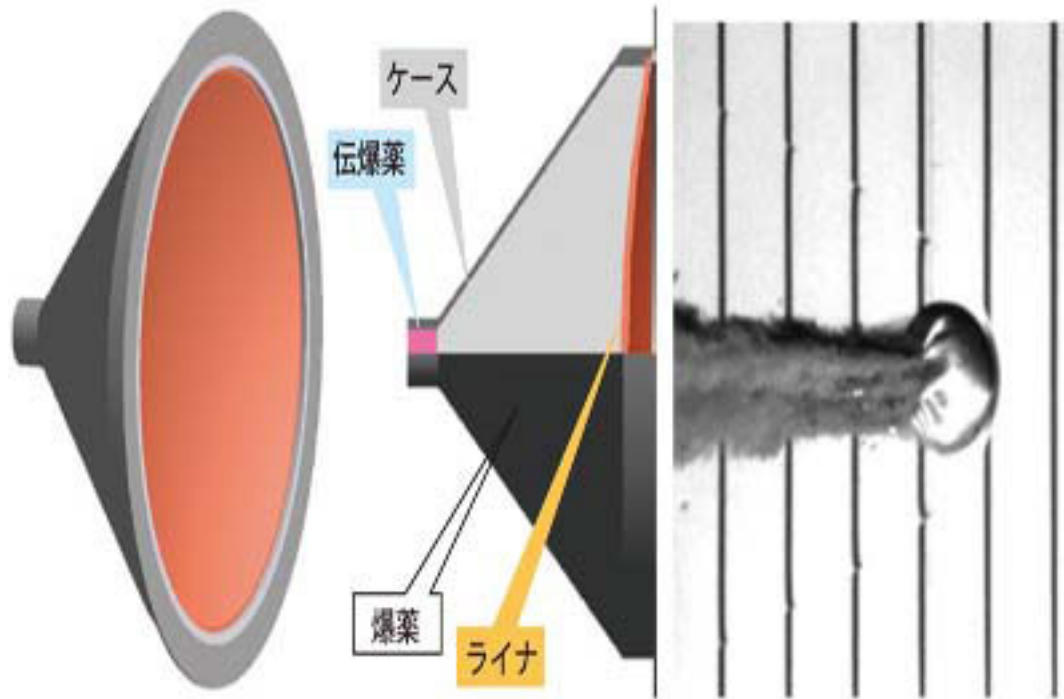
小惑星表面に降ろし、4つの観測装置で表面を調べる。DLR(ドイツ航空宇宙センター)とCNES(フランス国立宇宙研究センター)による製作・提供。
4つの観測装置を搭載し、1度だけジャンプして移動が可能。

サンプリング装置



ホーンの先端に小さな折り返し部品をつける改良をした。この折り返しの上に砂礫を引っ掛け(1～5mm程度の砂礫が乗る形状)、探査機が上昇中に急停止をすると砂礫はそのまま上昇を続けキャッチャーに入る仕組みである。これは弾丸によるサンプル採取のバックアップとなる。

衝突装置(SCI)と衝突運用



2kgの銅の塊(衝突体:ライナ)を秒速2kmに加速して小惑星表面に衝突させることで、人工的なクレーターを作る。

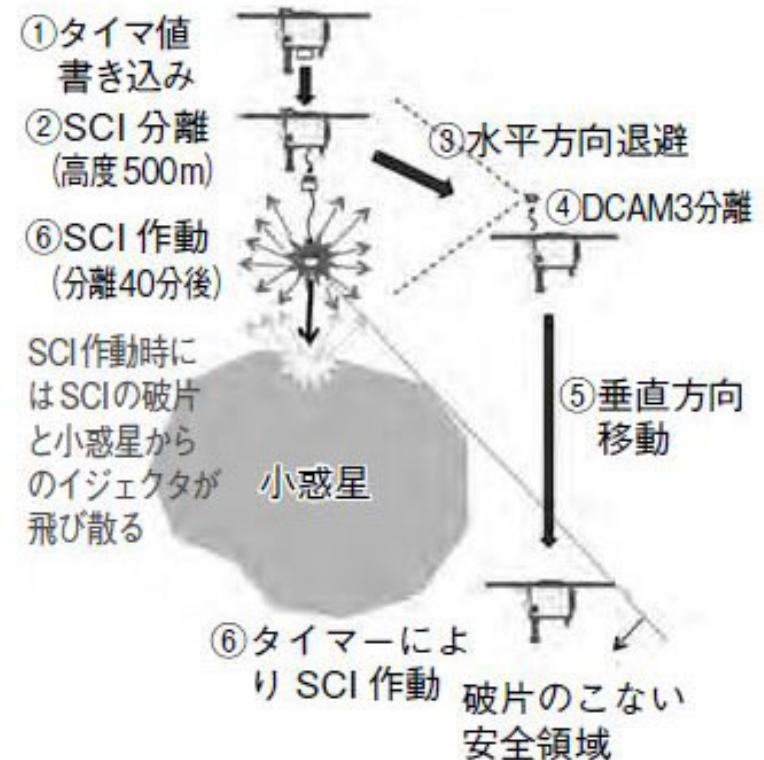
衝突体によって作られたクレーターからのサンプリングを行い、表層下の“新鮮な”物質を採取し、表面物質との違いを調べる。

(左上)

爆薬の力によって、ライナを前方に高速で射出する。

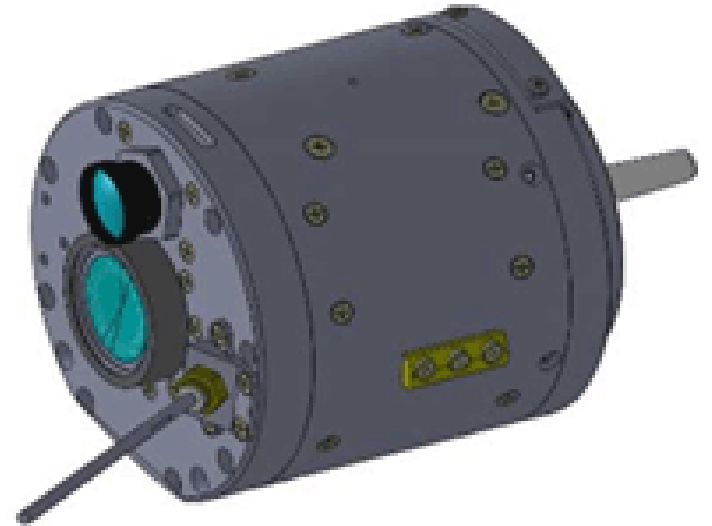
(右上)

飛翔するライナの様子。
速度はおよそ2km/s



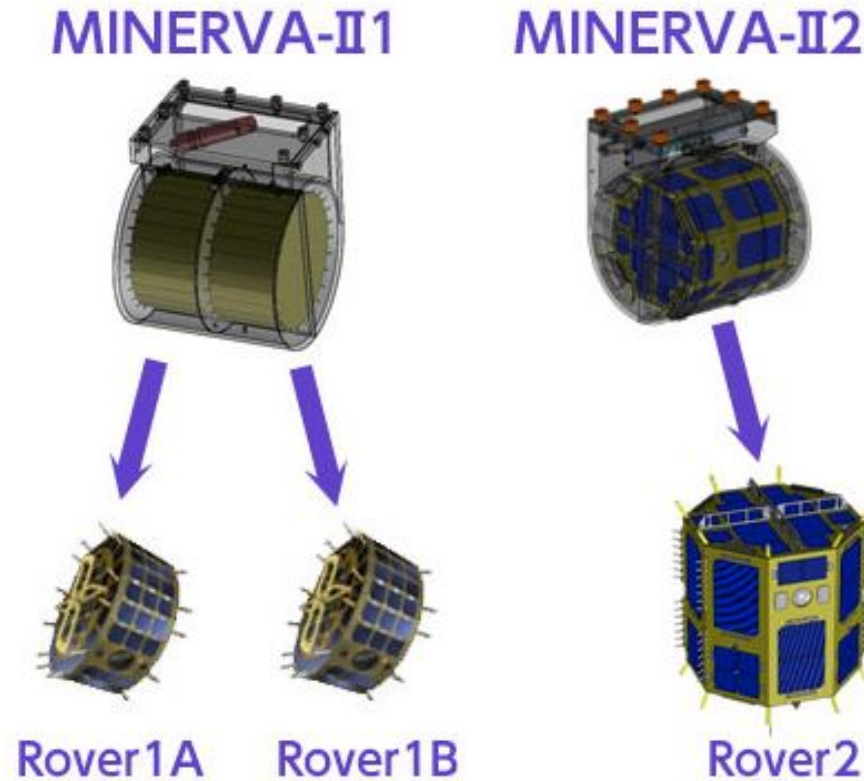
衝突運用(退避マヌーバ)

分離カメラ(DCAM3)



衝突装置による衝突実験の際、母船「はやぶさ2」は破片やダストを避けて小惑星の影に退避する。分離カメラは、母船が退避中に衝突装置の爆破と小惑星表面への衝突を撮影するため、分離される小型カメラである。撮像した画像データはリアルタイムで母船に無線で送られる。

小型ローバ



小惑星表面に降ろして表面を調べる。MINERVA-II1とMINERVA-II2を搭載している。分離機構を含む総質量は、II1が2.5kg、II2が1.6kg。各探査ロボットはそれぞれホップして移動し、小惑星表面の探査を行なう。

II1は、ISAS/JAXA、会津大学が製作

II2は、東北大学、東京電機大学、大阪大学、山形大学、東京理科大学)が製作

はやぶさ 2 の運用の特徴

はやぶさ2をリュウグウに着陸させるのは、日本から、ブラジルにある長さ6センチの「的を狙う」ほどの精度が求められるとも表現されるが、これは必ずしも適切ではない。

はやぶさ2には地球センサー、太陽センサー、星センサー、ジャイロなどが搭載されており、はやぶさ2は自律的に姿勢をコントロールしている。

搭載されたこれらのセンサーから送られてくる情報と地上の管制局との距離情報を基に、地上の管制室で軌道を計算し、何時何分に何分間ジェットを噴射して軌道を修正しなさいというコマンドを、はやぶさ2に送って軌道を修正し、リュウグウに到達させる。

はやぶさ2がリュウグウの近くにいるときは、地上の管制室からはやぶさ2に電波を送っても届くのに18分ほどかかる。

もし、はやぶさ2が降下中に障害物を発見した場合、管制室から障害物を避けるように操作しても、間に合わない。そこでリュウグウの表面近くまで降下したはやぶさ2は、自身の判断で自律して動くようになっている。

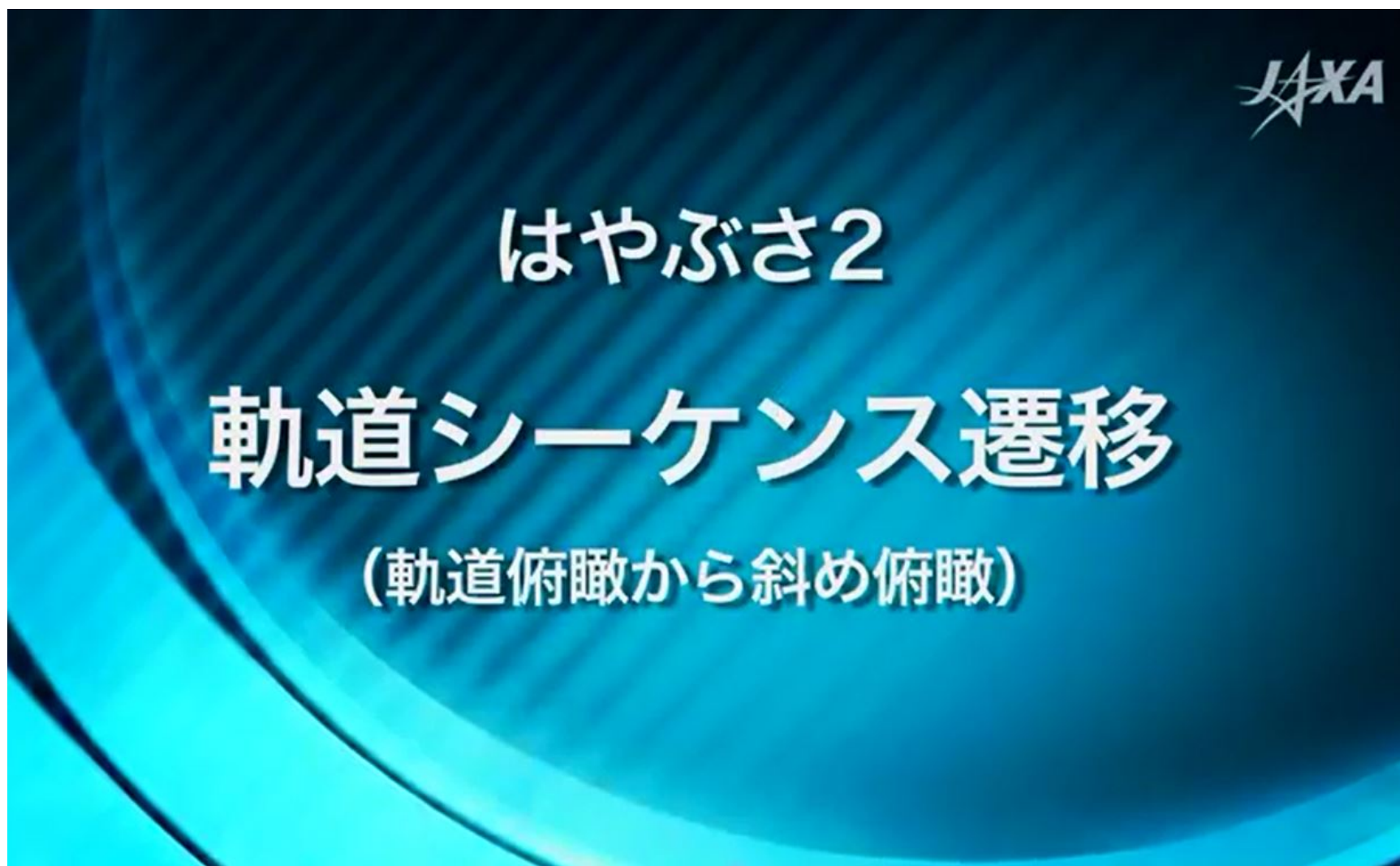
地上から送るコマンドは、

「何時何分になったら、周りをよく見ながら着陸を開始しなさい」

「予想したよりも対象が暗いので、センサーの感度を上げて観察しなさい」

といった教育である。(瞬時瞬時の指示はできない)

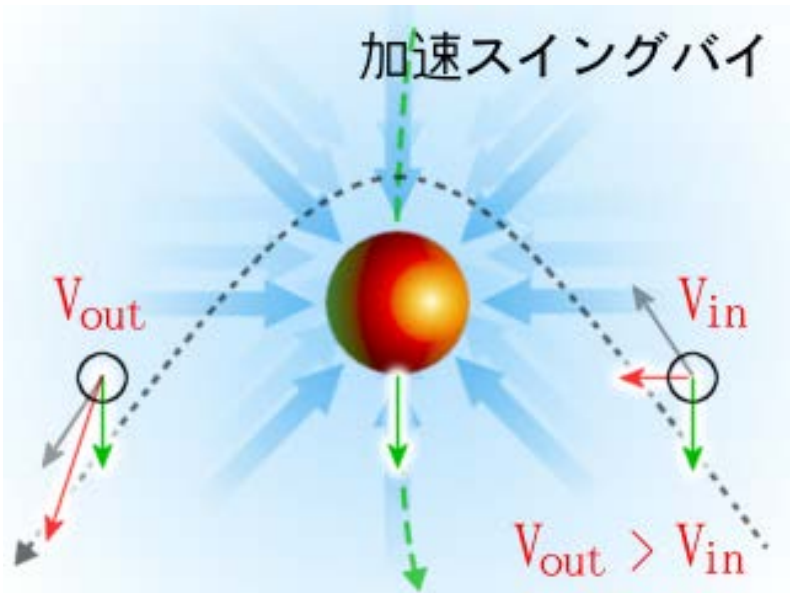
打ち上げから地球到着まで



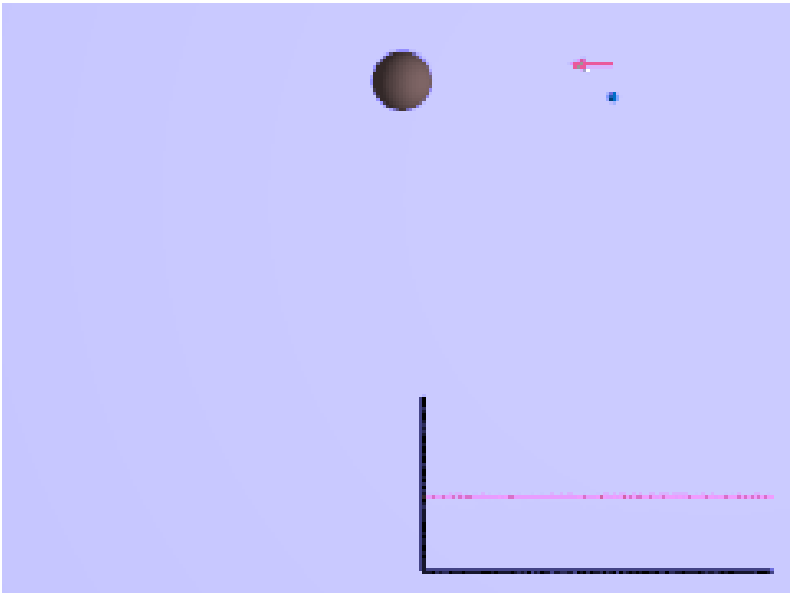
動画中の1999JU3は、小惑星ryuguの仮符号
画面をクリックすると、動画がスタートします

探査機の加速・減速に役立つスイングバイの話

加速スイングバイの場合



緑は惑星の公転速度、赤は宇宙機の、惑星に対する速度と天体の公転速度の合成速度を示す。公転する天体の後ろ側から進入すると、離脱時には増速している。



加速スイングバイの動画。グラフは太陽を基準とした宇宙機の速さの時間による変化を示す。最終的には進入時よりも増速しているのが判る。

減速スイングバイの場合もある

公転する天体の前方から進入すると、離脱時には減速している。

探査機が行ったスイングバイの例

太陽系を脱出した例

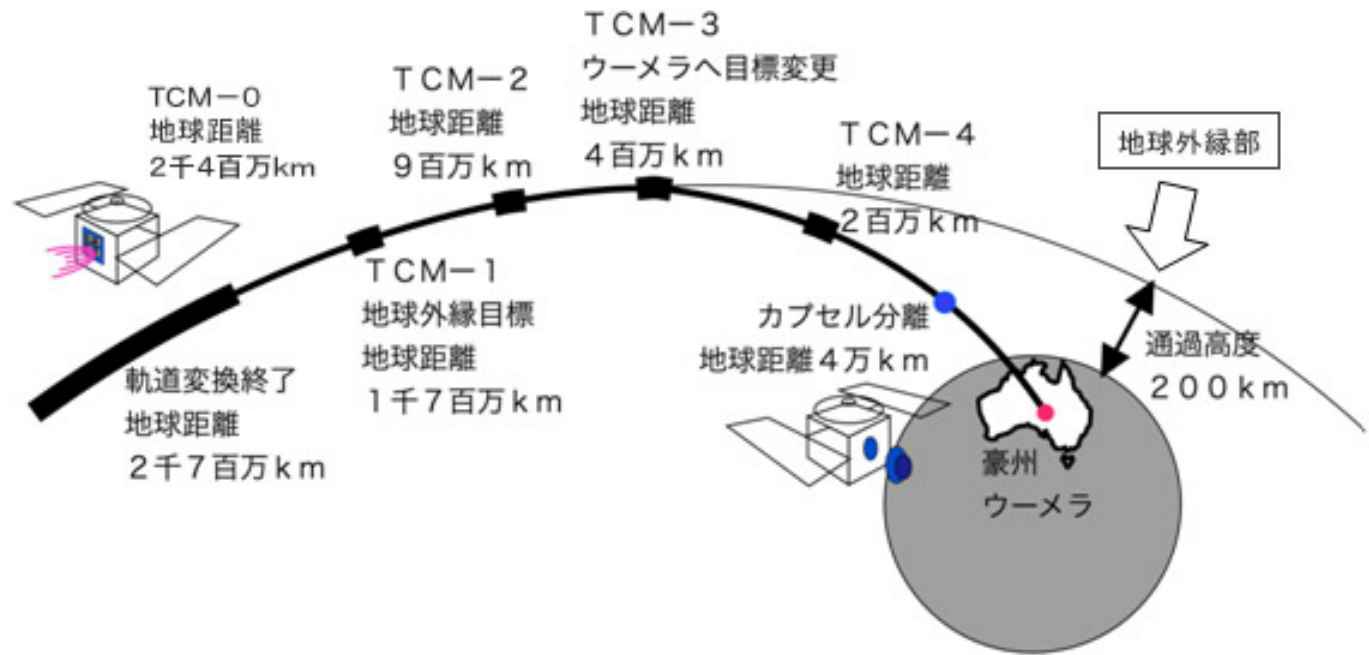
1977年に打上げられた**ボイジャー1号と2号**が、地球軌道から木星へ向けて出発したときの速度は地球の公転速度を足して 40 km/s ほどであり、地球の公転軌道上から太陽系を脱出するのに必要な 42.1 km/s を満たしていなかった。しかし、木星でスイングバイを行い、増速することで太陽系を脱出することができた。

ボイジャー2号の場合、地球軌道から約 36 km/s の速度で出発した。木星軌道に達したときには、速度は約 10 km/s になっていたが、木星をスイングバイし、約 21 km/s まで増速した。木星軌道での太陽系脱出速度は 18.5 km/s なので、木星スイングバイにより太陽系を脱出できるようになったといえる。その後、土星軌道に到達したときには、速度は約 16 km/s になっていたが、土星をスイングバイし、約 24 km/s まで増速した。さらに、天王星でわずかながら増速、海王星では逆にわずかながら減速し、太陽系を脱出していった。

推力不足を補った例

1984年10月に国際ハレー彗星観測艦隊といわれた惑星探査機群に参加していた **NASAの国際彗星探査機(ICE)** は、既存の残存燃料の少ない衛星を再利用する形で急遽仕立てられたものであり、NASAのスイングバイ魔術といわれた5回に及ぶ月スイングバイにより、ハレー彗星のコマから噴出される尾の観測を行った。また、1989年10月18日に打上げられたアメリカの**木星探査機ガリレオ**は、スペースシャトル「アトランティス」に搭載して打ち上げられ、さらに、ロケットを使って地球の軌道を離れたが、このロケットはチャレンジャーの事故もあって当初の計画より推力の少ないものに變更されていた。そのままでは推力不足で木星に向かうことができないので、一旦逆の金星に向かい、金星、地球、地球とスイングバイを行って増速する方法を用いて木星に向かった。

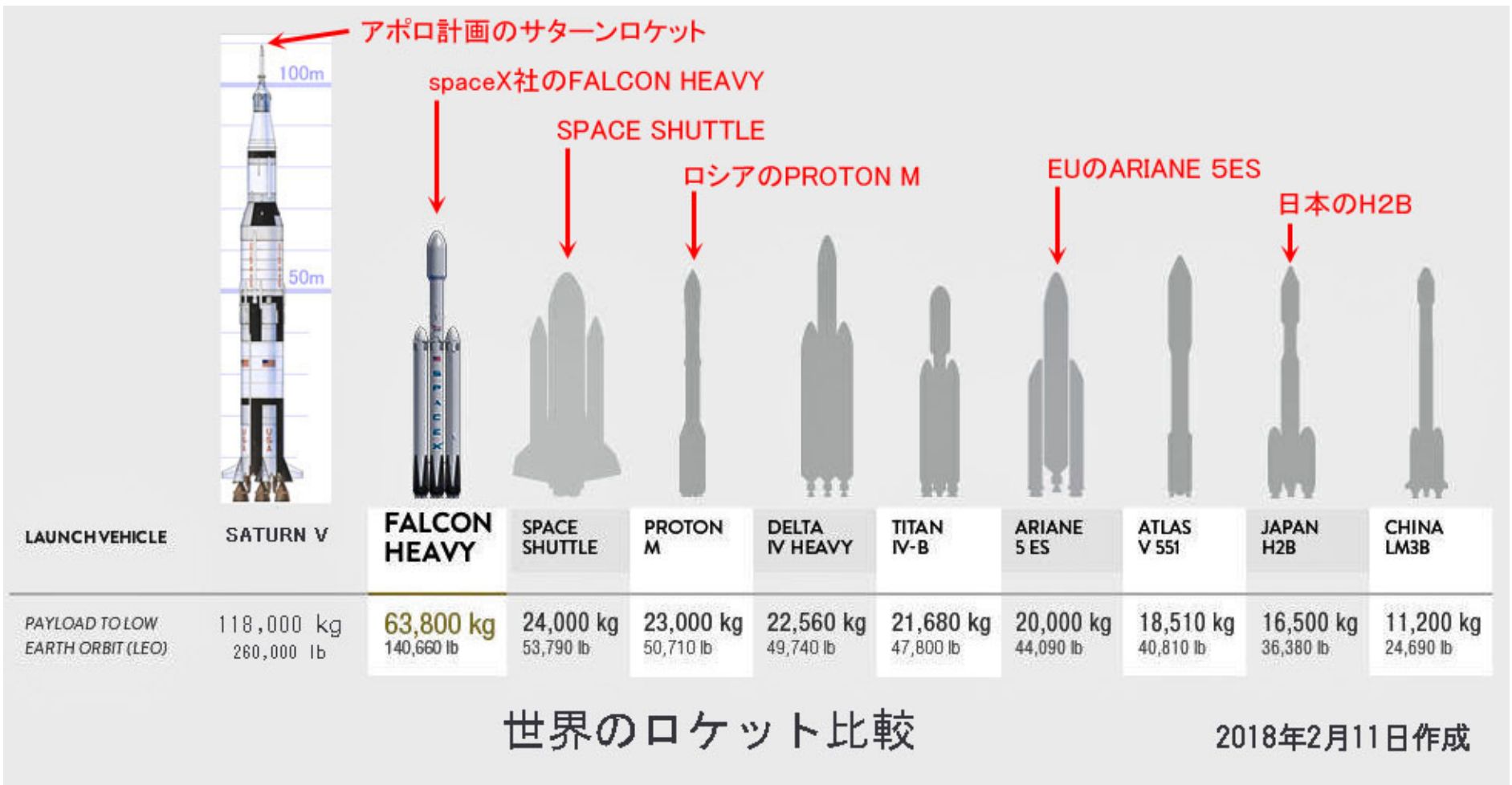
サンプルリターン（はやぶさ の場合を示す）



サンプルリターンに成功した探査機

打上げ年	探査機名	打上げ国	サンプル	収集先	帰還日	結果
1970年	ルナ16号	ソ連	101gの土	月	1970年9月24日	成功
1972年	ルナ20号	ソ連	55gの土	月	1972年2月25日	成功
1976年	ルナ24号	ソ連	170gの土	月	1976年8月22日	成功
1999年	スターダスト	米	100万以上の粒子	ヴィルト第2彗星	2006年1月15日	成功
2001年	ジェネシス	米	太陽風の粒子	太陽-地球ラグランジュ点L ₁ 付近	2004年9月8日	部分的な成功 帰還時に試料の一部が損傷
2003年	はやぶさ	日本	1,500の微粒子	小惑星イトカワ	2010年6月13日	部分的な成功 予定より少ない試料を回収
2014年	はやぶさ2	日本	1gから数gの土 (予定)	小惑星リュウグウ	2020年11月～ 12月(予定)	観測作業中
2016年	オシリス・レックス	米	60gから2kgの土 (予定)	小惑星ベンヌ	2023年9月 (予定)	観測作業中

世界の打上げ機(参考)



5. 世界の打上げ機

米民間企業SpaceX社の Falcon Heavy の打上げと回収



打上げ



上段の回収(2機同時)



ご清聴、有難うございました

本資料作成に当たり、JAXA、NASA、Wikipedia などの資料を参考にしました