



2018年の小惑星リュウグウ到着にむけて 小惑星探査機「はやぶさ2」の近況

2018年6月7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、

- ・イオンエンジン往路運転終了
- ・光学電波複合航法(光学航法)
- ・今後のスケジュール

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. イオンエンジン運用
3. 光学電波複合航法
4. ミッションスケジュール
5. その他
6. 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

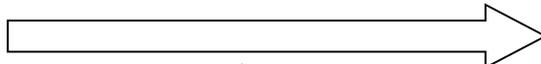
サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



ミッションの流れ概要

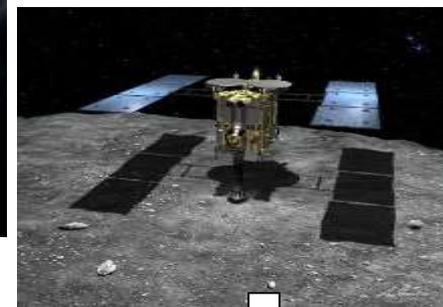


打上げ
2014年12月3日



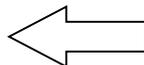
小惑星到着
2018年6月27日前後(予定)

▲
地球スイングバイ
2015年12月3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。

地球帰還
2020年末ごろ



小惑星出発
2019年11-12月



人工クレーター
の生成



衝突装置
放出

サンプル分析

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。

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。

(イラスト 池下章裕氏)

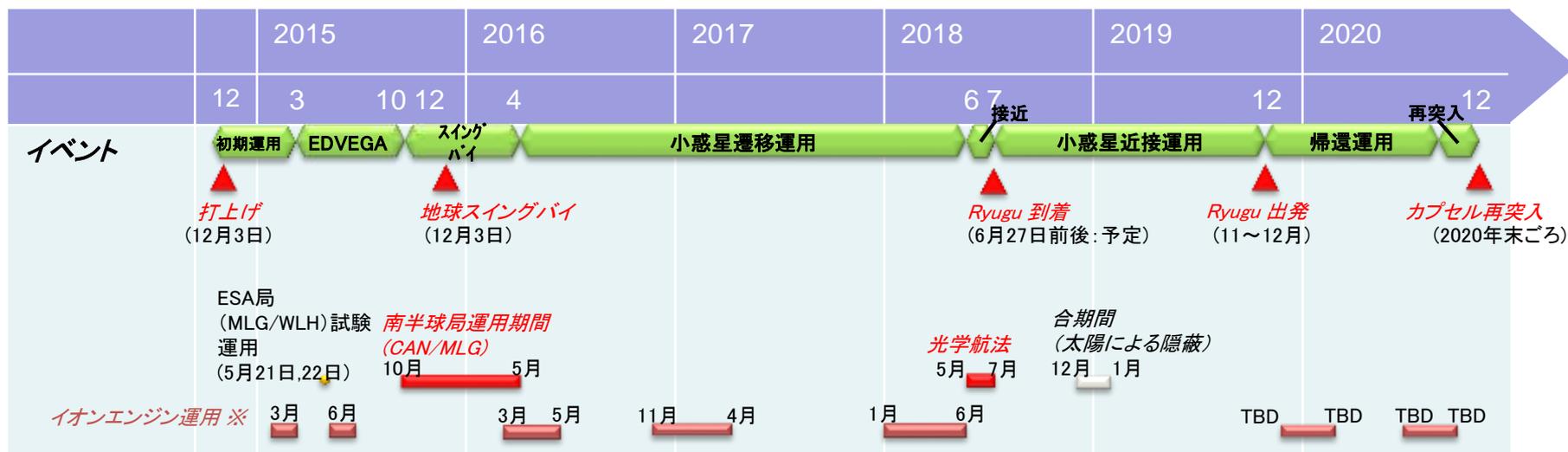


1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

現状:

- リュウグウ-探査機間の距離は本日(6月7日)現在約2100km。
- 6月3日、イオンエンジン往路運転終了。
- リュウグウ到着は6月27日前後の予定。
- リュウグウ到着に向けて光学電波複合航法を実施中。

全体スケジュール:

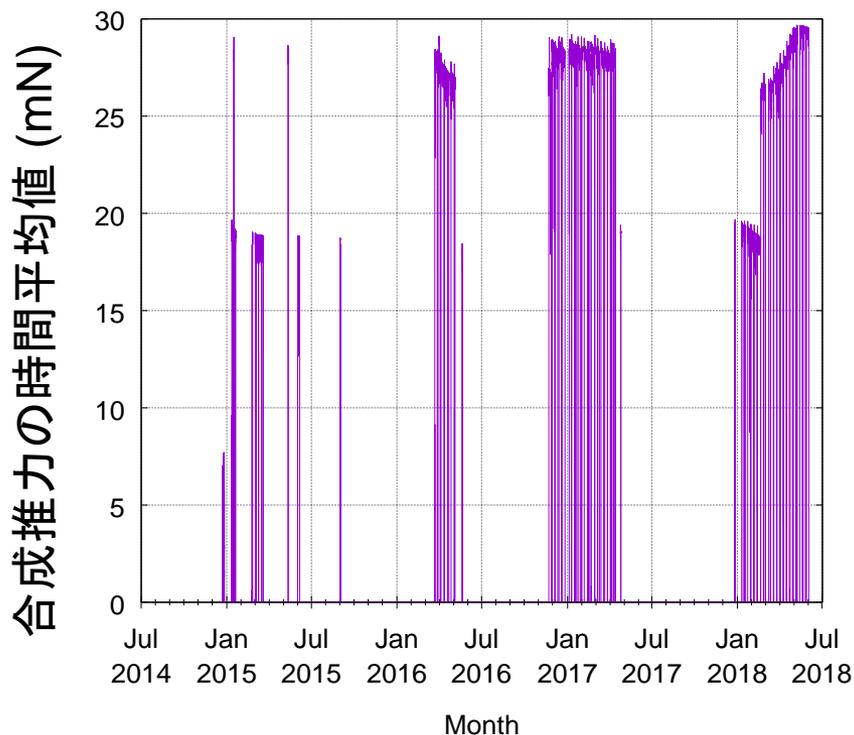




2. イオンエンジン運用

- 2018年1月10日から開始していた第3期イオンエンジン運転は6月3日 14:59(日本時間)に393 m/sの増速を完了した。
- これで、往路のイオンエンジン運転はすべて終了。
- 往路では24 kgの推進剤キセノンを消費し42 kgが残っている。
- 往路の総増速量は約1015m/s。

イオンエンジンシステムIESの推力の全履歴



	スラスタ	はやぶさ2	はやぶさ
累積運転時間(h)	A	6450	7
	B	11	12809
	C	5193	11989
	D	6418	14830
	IES	6515	25590
	のべ	18073	39635
総力積(MN・s)	A	0.2192	0.0001
	B	0.0002	0.3221
	C	0.1753	0.2639
	D	0.2209	0.3613
	IES	0.6158	0.9474
	最大推力(mN)	A	10.03
B		7.61	8.36
C		10.08	8.30
D		10.16	7.95
IES		29.67	24.12

動作試験含む。「IES」は1台以上の動力航行を指す。



2. イオンエンジン運用



- イオンエンジンの計画外停止(自動安全化処置)の作動頻度が大幅に減少し安定稼働時間が向上した。「はやぶさ」での経験から各種監視設定を適切に行えたため。
 - はやぶさ 68回/25590時間 → 平均376時間
 - はやぶさ2 4回/6515時間 → 平均1629時間
- 地上からの追跡時間を「はやぶさ」よりも35%削減して運用を効率化した。
 - 地上からの追跡時間の動力航行時間に対する比率
 - はやぶさ $5059\text{時間}/25590\text{時間}=20\%$
 - はやぶさ2 $850\text{時間}/6515\text{時間}=13\%$

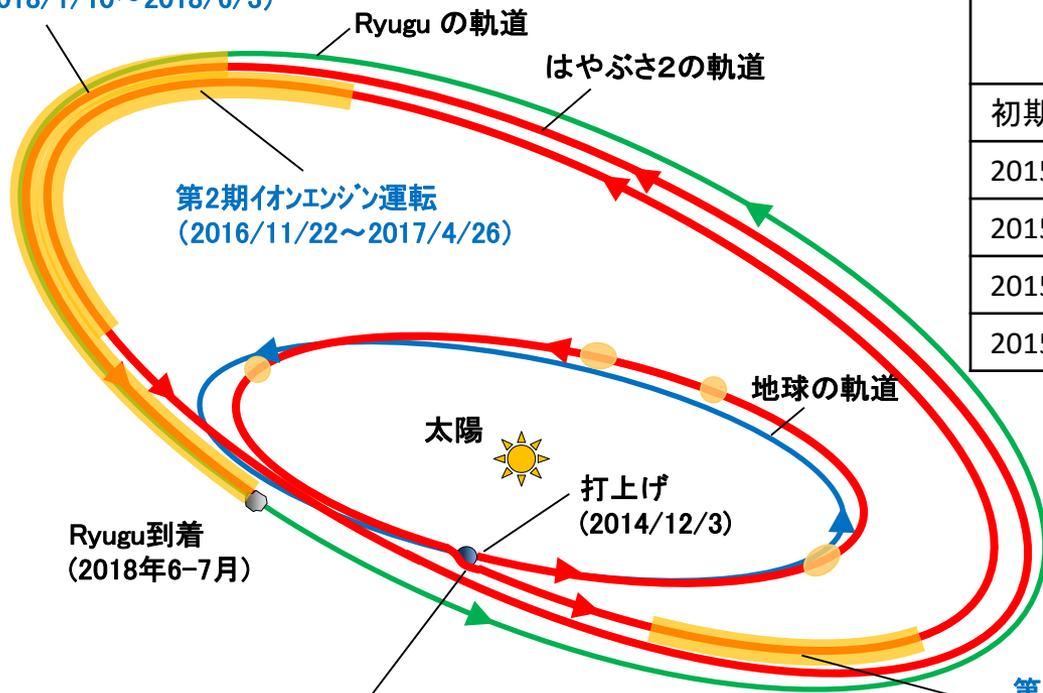
1日4時間に短縮した「半パス」運用を多用しつつ、運用頻度は毎週5、6回を維持。イオンエンジンを含む探査機が快調であることや、電波航法による軌道決定技術の向上により時間短縮が可能になった。



2. イオンエンジン運用

往路におけるイオンエンジン運転のまとめ

第3期イオンエンジン運転
(2018/1/10~2018/6/3)



第2期イオンエンジン運転
(2016/11/22~2017/4/26)

■スイングバイ以前

期間	名称	台数	増速 m/s	運転 時間
初期機能確認	IES動作試験	-	-	-
2015/3/3-21	IES動力航行1	2	44	409 h
2015/5/12-13	IES最大推力試験	3	4	24
2015/6/2-6	IES動力航行2	2	11	102
2015/9/1-2	IES動力航行3	2	1.3	12

IES: イオンエンジンシステム

第1期イオンエンジン運転
(2016/3/22~5/21・追加噴射含む)

速報値と工学データベース格納値の間に差異があったため

地球スイングバイ
(2015/12/3)

■スイングバイ以降

期間	名称	台数	増速 m/s	運転時間
2016/3/22~2016/5/21	第1期イオンエンジン運転	3(一部2台)	127	798 h
2016/11/22~2017/4/26	第2期イオンエンジン運転	3(一部2台)	435	2558 2593
2018/1/10~2018/6/3	第3期イオンエンジン運転	2→3	393	2426 2475

↓
2018/6/7
訂正



3. 光学電波複合航法

- 光学電波複合航法(略して光学航法=オプティカル・ナビゲーションと呼ぶ)とは、探査機に搭載したカメラ等により目的天体を確認しながら接近する手法
- 「はやぶさ2」がリュウグウに到着するためには必須の技術
- 通常の電波航法のみでは、地球から約3億km離れたところに位置する大きさが1km程度の小惑星リュウグウに到着することは不可能

理由:リュウグウの位置誤差が2018年5月初めの時点で約220kmであるため(誤差の値は 3σ :99.7%の確率)

参考:探査機については、DDOR(Delta Differential One-way Range)という技術で、約3億km彼方において数kmの誤差で位置が推定できる。

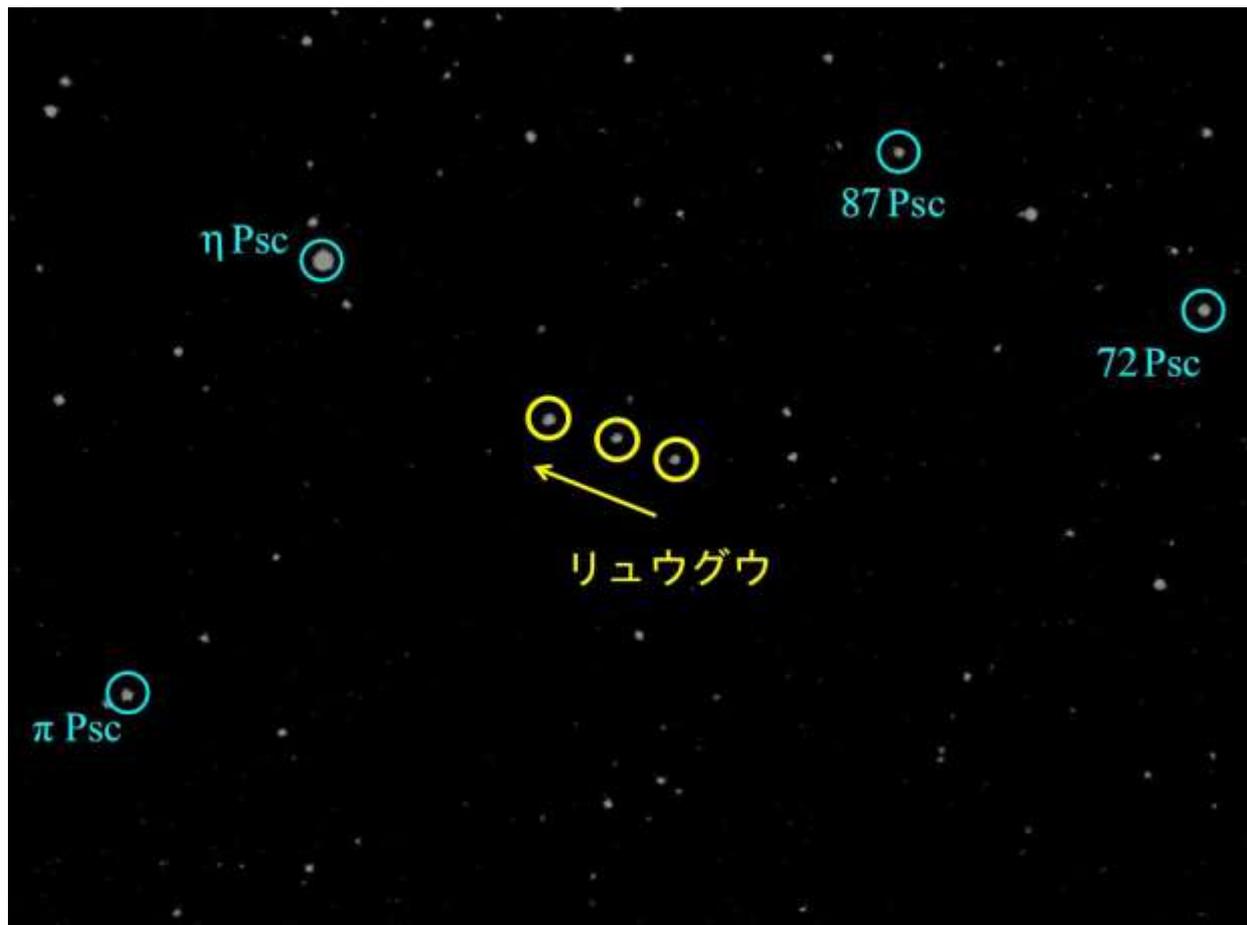
※「はやぶさ」の場合にはDDORの技術を使っていなかったため、「はやぶさ」の位置誤差が大きかった。一方、小惑星イトカワは事前にレーダーの観測があったため、軌道がより正確に分かっていた。これらの事情のため、「はやぶさ」の場合も光学電波複合航法を行うことでイトカワに到着することができた。



3. 光学電波複合航法

STT(スタートラッカ)の撮影による

- ・5月はまだイオンエンジン
運転中であったため、光
学航法カメラをリュウグウ
に向けることができなかつ
た。その代わりに、通常は
探査機の姿勢を決めるた
めに使われるスタートラッ
カでリュウグウの撮影を
試みた。
- ・撮影されたリュウグウの位
置より、リュウグウおよび
探査機のより正確な軌道
を推定した。
- ・探査機からの距離は約7
万kmで、約5等星の明るさ
。



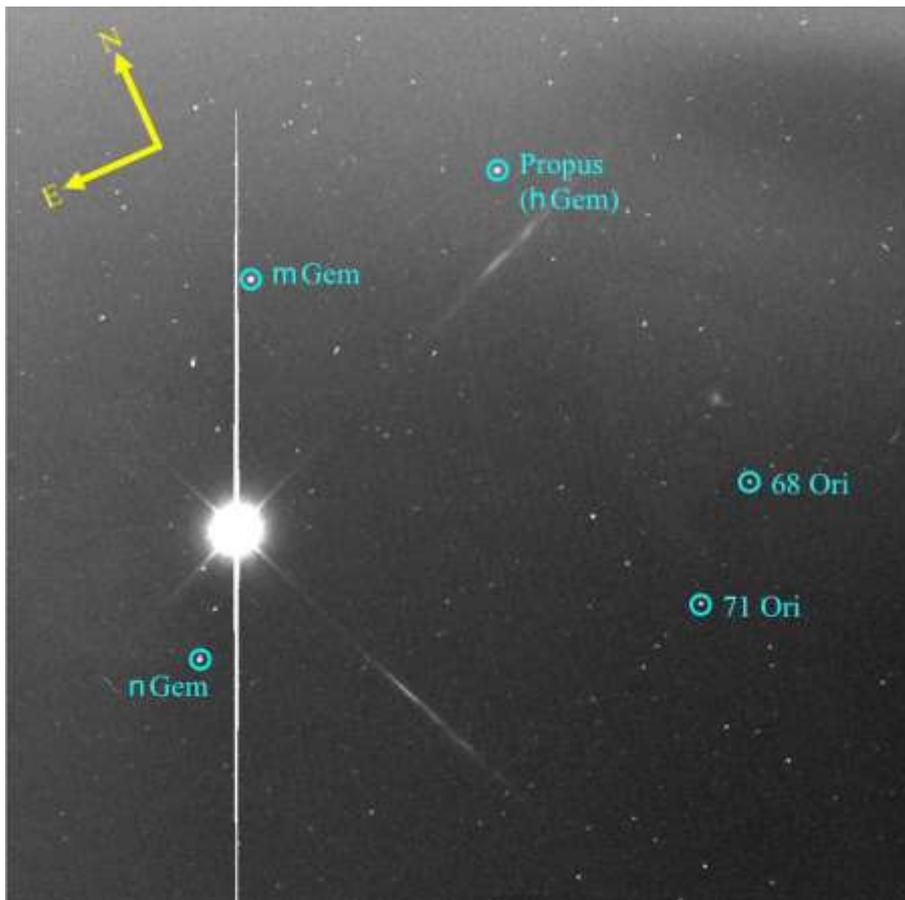
スタートラッカによって撮影されたリュウグウ。右から5月12日1時頃、5月13日2時頃、5月14日1時頃(日本時間)の撮影。探査機から見てうお座の方向(Pscとはうお座の略符)。画角は約 $9^{\circ} \times 7^{\circ}$ 。(画像提供:JAXA、京都大学、日本スペースガード協会、ソウル大学) 11



3. 光学電波複合航法

ONC(光学航法カメラ)の撮影による

- ・6月5日よりONC(TおよびW1)によってリュウグウの撮影を行い、光学航法を試みている
- ・右の写真は6月6日、04:15(日本時間)頃に、ONC-Tでリュウグウ方向を撮影したもの
- ・リュウグウまでの距離は約2600km
- ・リュウグウの明るさは約-5等
- ・露出時間が178秒と長いのでリュウグウは非常に明るくにじんでいる(背景の恒星の撮像が目的)



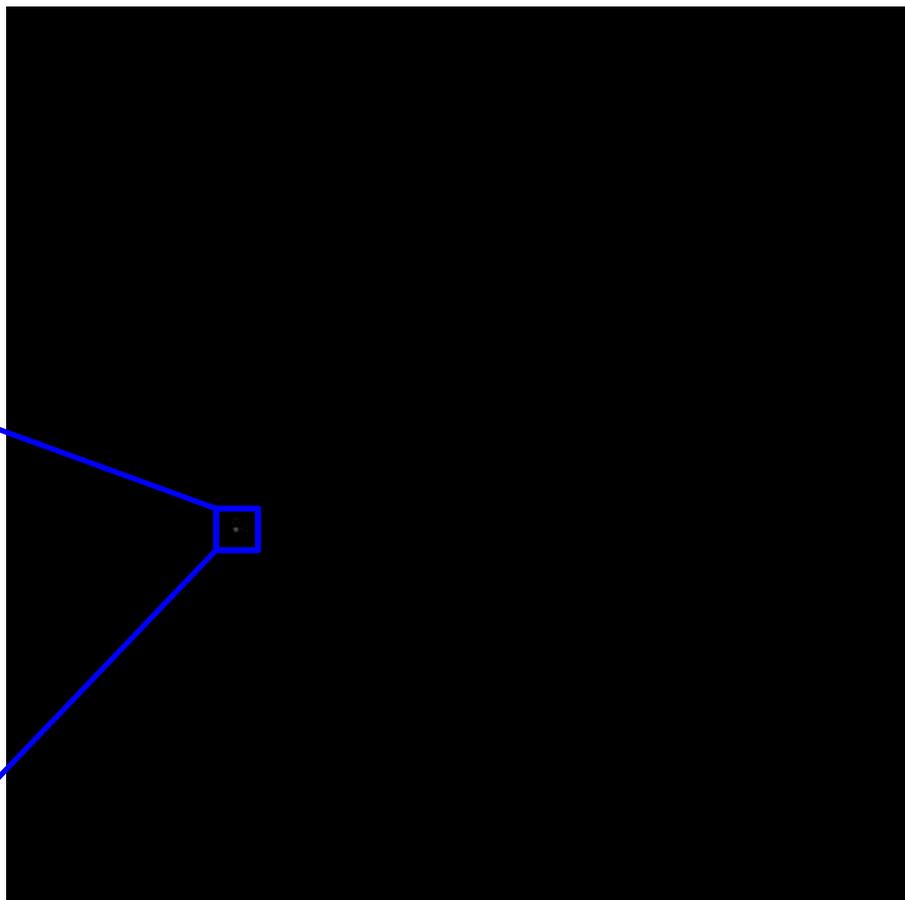
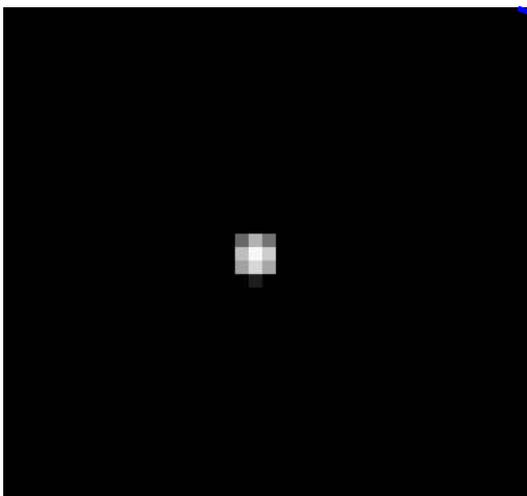
ONC-Tによって撮影されたリュウグウ。2018年6月6日、04:15(日本時間)頃の撮影。視野は6.3度角 x 6.5度角。露出時間178秒。探査機から見るとふたご座(Gem)の方向。
地上観測チーム: JAXA, 京都大学, 日本スペースガード協会, ソウル大学
ONCチーム : JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研



3. 光学電波複合航法

ONC(光学航法カメラ)の撮影による

- ・露出時間を約0.09秒とした撮像
- ・小惑星のみ点に写る
- ・像の大きさは直径が3ピクセル程度
1ピクセル=約22秒角
=約0.3km@2600km
- ・形は分からない



ONC-Tによって撮影されたリュウグウ。2018年6月6日、04:15(日本時間)頃の撮影。
視野は6.3度角 x 6.5度角。露出時間約0.09秒。

地上観測チーム: JAXA, 京都大学, 日本スペースガード協会, ソウル大学

ONCチーム : 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



4. ミッションスケジュール



直近の運用

- 6月3日：小惑星接近誘導開始
(小惑星到着まで光学電波複合航法を継続)

6月14日の記者説明会で詳細な報告をする

- リュウグウ到着は6月27日前後の予定(実運用の状況によって数日前後する可能性あり)

小惑星近傍での運用

- 6月～8月の観測により具体的なスケジュールが決まる
- 現時点で想定されるスケジュールは次のページに示す



4. ミッションスケジュール



暫定版

年	月日	事項	状況
2018	1月10日	第3期イオンエンジン運転開始	済み
	6月 3日	イオンエンジン運転終了	済み
	6月 3日	小惑星接近誘導開始(距離3100km)	済み
	6月27日前後	小惑星到着(高度20km)	予定
	7月末	中高度観測1(高度5km)	予定
	8月	重力計測降下(高度1km)	予定
	9月～10月	タッチダウン運用スロット1	予定
	9月～10月	ローバ投下運用スロット1	予定
	11月～12月	合運用(通信不可の期間)	予定
2019	1月	中高度観測2(高度5km)	予定
	2月	タッチダウン運用スロット2	予定
	3月～4月	クレーター生成運用	予定
	4月～5月	タッチダウン運用スロット3	予定
	7月	ローバ投下運用スロット2	予定
	8月～11月	小惑星近傍滞在	予定
	11月～12月	小惑星出発	予定

このスケジュールは、リュウグウ到着後様々な要因で変更される可能性がある。
 状況が「済み」以外は、確定しているわけではないことに注意。



5. その他

アウトリーチなど

■ “小惑星リュウグウ” 想像コンテストの応募数

- 国内18ノード、海外7ノード
- 作品の応募数：国内1819件（未報告のノード：1）
海外 150件（未報告のノード：1）
- プロジェクトメンバーも想像図を公開

<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180605/>

■ 「はやぶさ2」どんなことでも質問”箱”（日本惑星協会）に協力

- 「はやぶさ2」について広く質問を集めていただき、プロジェクトから回答することで、多くの人に「はやぶさ2」を知っていただくことが目的。

<http://planetary.jp/hayabusa2/FAQ/index.html>



6. 今後の予定



メディアの方の取材、情報公開について:

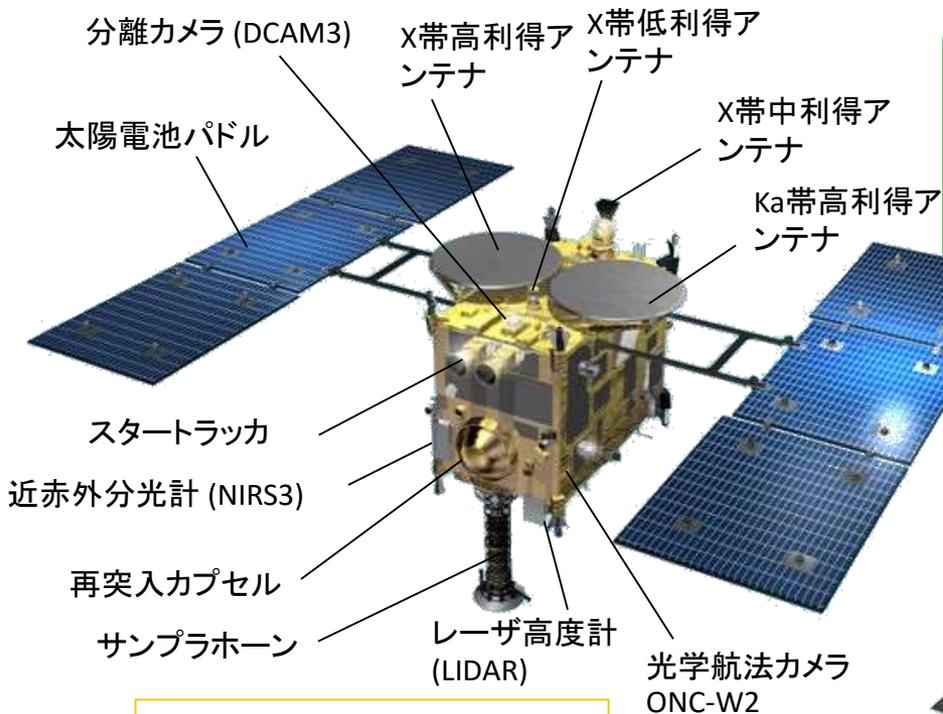
- 次回の記者説明会:6月14日午前中(@東京事務所)を予定
- 6月27日前後に予定されているリュウグウ上空20km到着の際は、プレスリリースを行い、その後記者説明会(@相模原キャンパス)を予定。
- 7月以降も定期的に記者説明会を実施予定。
- はやぶさ2プロジェクトのスポークスパーソンは、JAXA宇宙科学研究所の久保田教授と吉川准教授です。はやぶさ2に関する取材をお受けします。



参考資料



探査機概要



光学航法カメラ ONC-T



レーザ高度計 LIDAR



近赤外分光計 NIRS3



中間赤外カメラ TIR

科学観測機器

小型着陸機・ローバ

MASCOT



DLRとCNES製作

ミネルバ2



II-1A



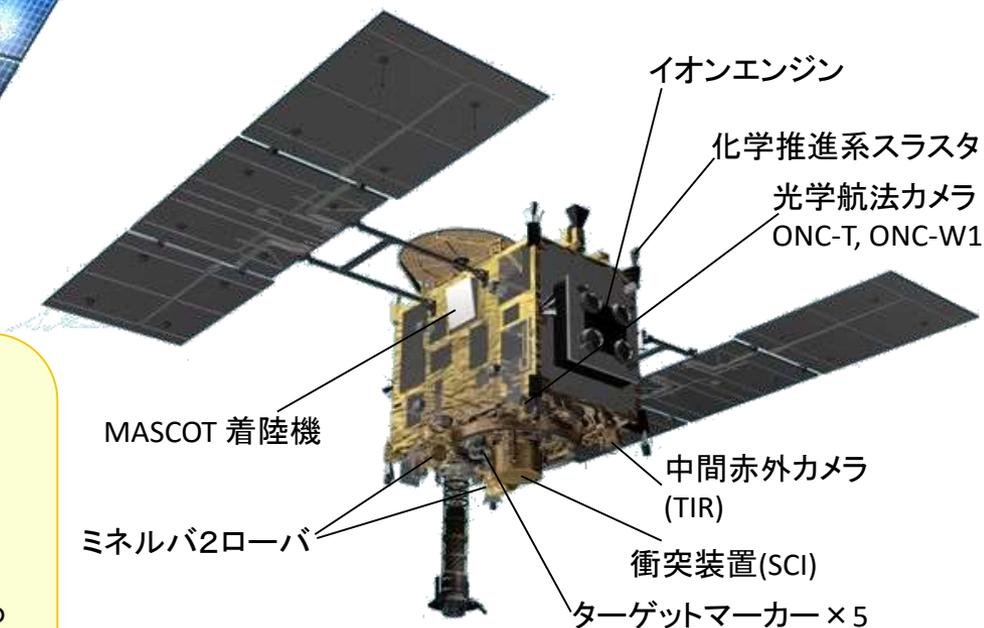
II-1B



II-2

II-1: JAXA MINERVA-II チームによる

II-2: 東北大およびミネルバ2コンソーシアムによる



大きさ: 1m × 1.6m × 1.25m (本体)
 太陽電池パドル展開幅6m
 重さ: 609kg (燃料込み)



イオンエンジン

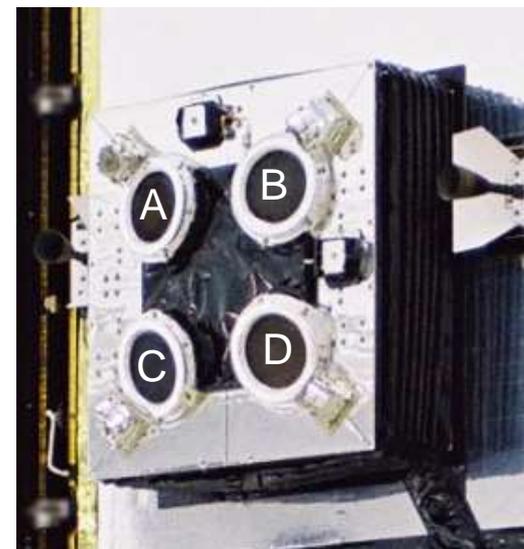
- 名称: $\mu 10$ (ミューテン)
口径10cmのマイクロ(μ)波イオンエンジン
宇宙科学研究所のミュー(M)ロケットにちなむ
- キセノン※をプラズマ(イオン)にし、電圧をかけて加速して噴射する。
- イオンの生成には、マイクロ波放電方式を用いている。
- 4台搭載し、最大で3台の同時運転を行うことで、最大で30mNの推力を発生する。
- キセノンは約66kg搭載し、合計で2km/s程度の加速を行う。
- 地球から小惑星また小惑星から地球へのクルージング時の軌道変更に使われる。

※キセノンを使う理由

- 単原子分子であるために2原子以上からなる気体よりも電離電圧が小さい。そのため加えたエネルギーが加速に使われる割合が多くなる。
- タンクへの高密度充填(比重1.2~1.5)が容易である。
- 他の物質と反応しにくい。
- 質量(原子量)が大きいので、加速の効率がよい。



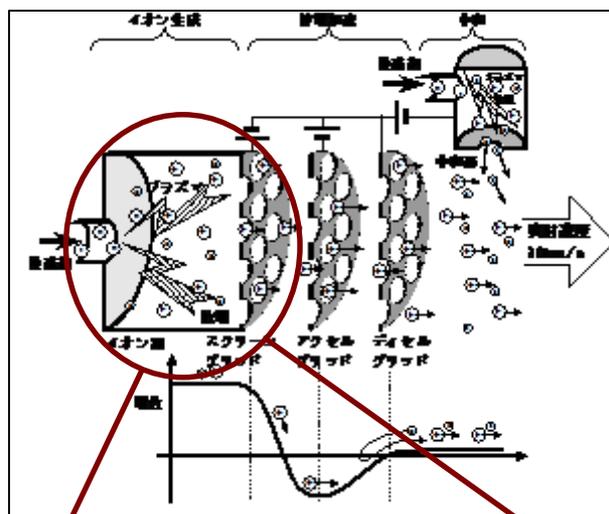
フライトモデル(スラストB)の真空チェンバ内での噴射試験の様子



はやぶさ2イオンエンジン



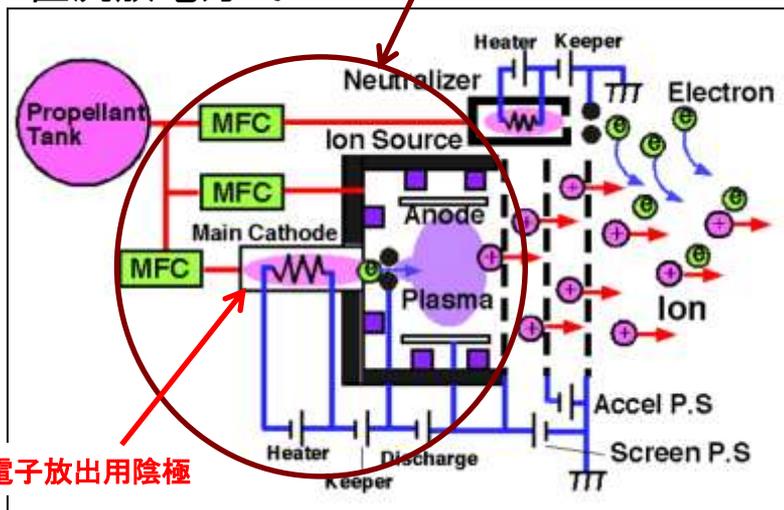
参考：イオンエンジンのしくみ



(イオンエンジンによる動力航行(宇宙工学シリーズ8)、コロナ社(2006)より)

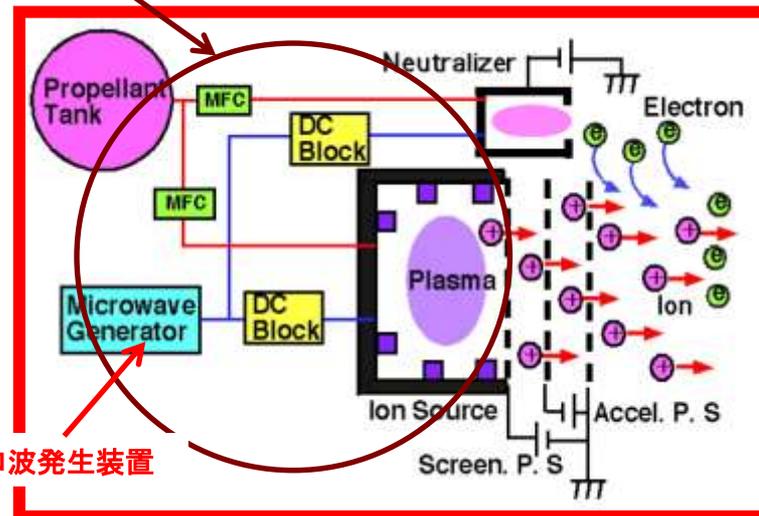
イオン生成部の方式の違い

直流放電方式



熱電子放出用陰極

マイクロ波放電方式



マイクロ波発生装置

注) 米国や英国、日本の宇宙開発事業団で開発されたイオンエンジンは直流放電式カウフマン型もしくはリングカスプ型イオンエンジンだった。

注) 日本の宇宙科学研究所で開発されたイオンエンジンはマイクロ波放電式イオンエンジンである。



リモートセンシング機器



光学航法カメラ(ONC)



ONC-T(望遠) ONC-W1,W2(広角)

科学観測や航法のための写真を撮影する

中間赤外カメラ(TIR)



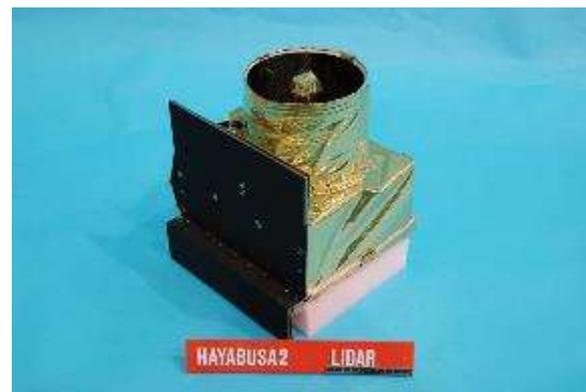
8~12 μm での撮像:小惑星表面温度を調べる

近赤外分光計(NIRS3)



3 μm 帯を含む赤外線スペクトル:小惑星表面の鉱物の分布を調べる

レーザ高度計(LIDAR)



30m~25kmの範囲で、小惑星と探査機との距離を測定する



光学航法カメラ(ONC)



ONC: Optical Navigation Camera

目的: 探査機誘導と科学計測のために
恒星と探査小惑星を撮像する。

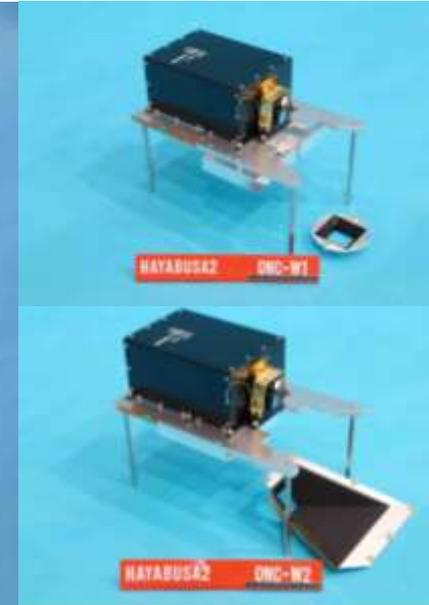
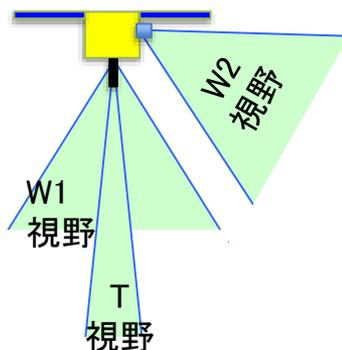
科学観測項目:

- 探査小惑星形状・運動の観測
直径、体積、慣性主軸方向、章動運動
- 表面地形の全球観測
クレーター、構造地形、礫、レゴリス分布
- 表面物質の分光特性の全球観測
含水鉱物分布、有機物分布、宇宙風化度
- 試料採取地点付近の高解像度撮像
表面粒子の大きさ、形状、結合度、不均一性
サンプラー弾痕や接地痕の観測



探査小惑星の素性解明

- 含水鉱物や有機物の分布、
宇宙風化、巨礫
- サンプル採取地点選定
• 小惑星どこから試料採取すべきかの基本情報
- サンプルの産状把握
• 試料採取地点の高分解能の撮像



	ONC-T	ONC-W1	ONC-W2
検出器	二次元 Si-CCD (1024 x 1024 ピクセル)		
視野方向	直下 (望遠)	直下 (広角)	側方 (広角)
視野角	6.35° × 6.35°	65.24° × 65.24°	
焦点距離	100m ~ ∞	1m ~ ∞	
空間分解能	1m/pix @高度10km 1cm/pix @高度100m	10m/pix @高度10km 1mm/pix @高度1m	
観測波長	390, 480, 550, 700, 860, 950, 589.5nm, および Wide	485nm ~ 655nm	



小惑星リュウグウについて

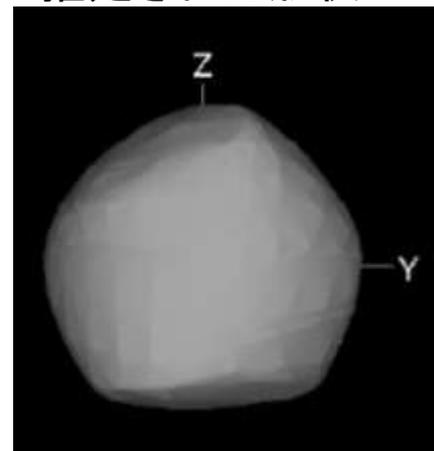


- 名称 : Ryugu (リュウグウ)
- 確定番号 : 162173
- 仮符号 : 1999 JU3
1999年5月に発見された小惑星
- 大きさ : 約900 m
- 形 : ほぼ球形
- 自転周期 : 約7時間38分
- 自転軸の向き : 黄経 $\lambda = 310^\circ \sim 340^\circ$
黄緯 $\beta = -40^\circ \pm \sim 15^\circ$
- 反射率 : 0.05 (黒っぽい)
- タイプ : C型 (水・有機物を含む物質があると推定される)
- 軌道半径 : 約1億8千万km
- 公転周期 : 約1.3年
- 密度・質量 : 現時点では不明であるが、 $0.5\text{--}4.0\text{g/cm}^3$ の密度を仮定している。
質量は $1.7 \times 10^{11}\text{kg} \sim 1.4 \times 10^{12}\text{kg}$ 程度。

リュウグウの軌道



推定された形状



(T. Mueller氏による)