

# 小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2019年12月19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、

- ・小惑星近傍運用の総括
- ・帰還巡航運用の計画

について紹介する。



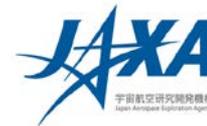
# 目次



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. 小惑星近傍運用総括(JAXA)
3. 小惑星近傍運用総括(NEC)
4. 業績(論文、表彰)
5. 帰還巡航運用計画
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・有機物の相互作用を解明することで、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:令和5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。



## 「はやぶさ2」主要緒元 (イラスト 池下章裕氏)

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)6月27日
地球帰還	令和2年(2020年)
小惑星滞在期間	約17ヶ月
小惑星出発	令和元年(2019年)11月13日
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

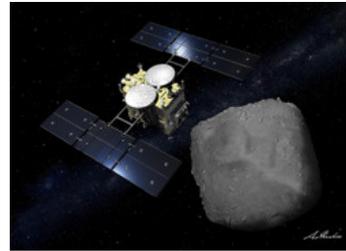
打ち上げ  
2014年12月3日



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



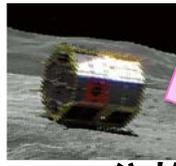
MINERVA-II1分離  
2018年9月21日



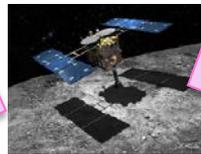
MASCOT分離  
2018年10月3日



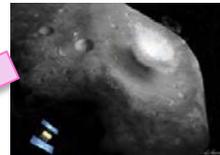
リュウグウ出発  
2019年11月13日



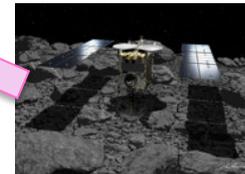
2回目のタッチ  
ダウン  
2019年7月11日



衝突装置  
2019年4月5日



1回目のタッチダウン  
2019年2月22日



MINERVA-II2分離  
2019年10月3日

地球帰還  
2020年末

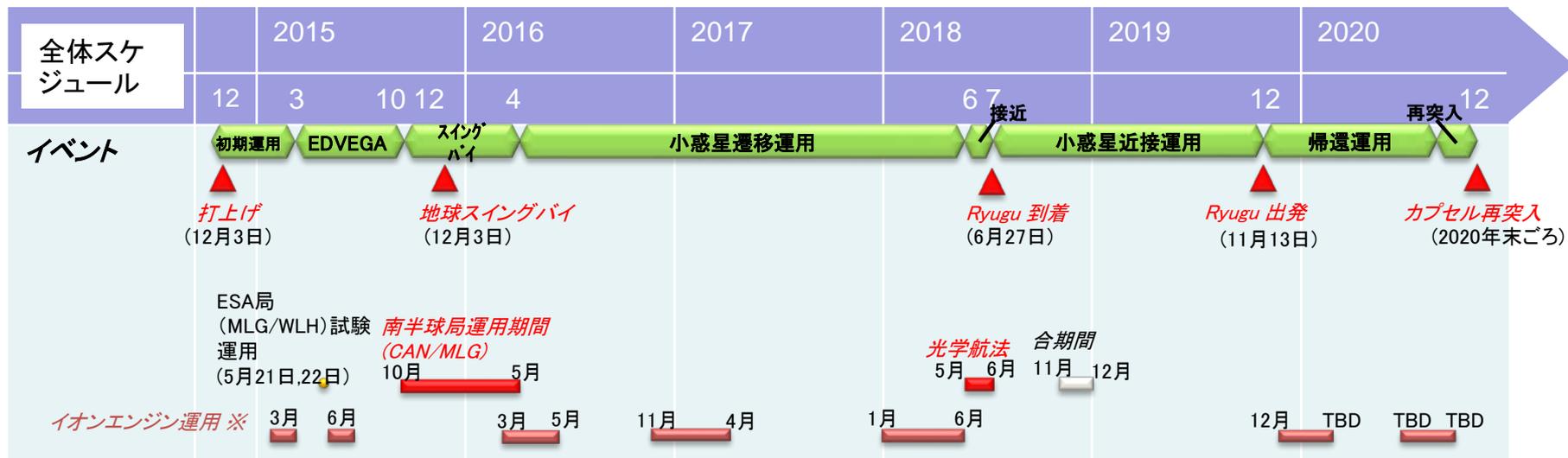


(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)



# 1. プロジェクトの現状と全体スケジュール

- 現状：
- 12月3日、11:00(JST、機上時刻)よりイオンエンジン3台による運転を開始し、地球帰還巡航運用に入った。12月14日からは、イオンエンジン2台で運用中。
  - AGU(American Geophysical Union:アメリカ地球物理学連合)の秋季会合(12月9-13日、サンフランシスコ)のユニオンセッションにて「はやぶさ2」の発表を行った。



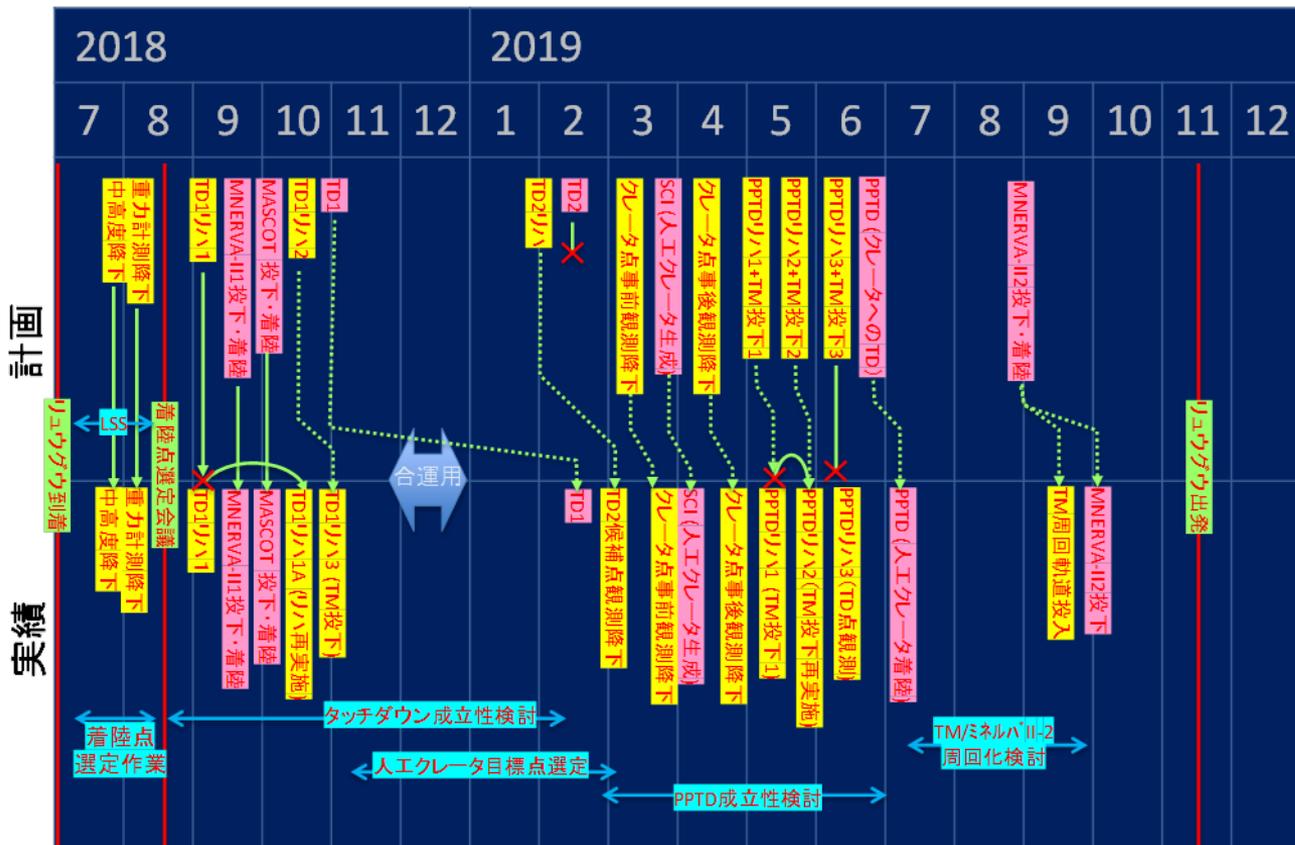


# 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)



## 運用実績

	計画	実績
総降下回数	: 17	18
着陸回数	: 3	2
ローバ着陸	: 4	4
クレーター生成	: 1	1
使用ターゲットマーカ	: 5	4
周回物体	: 0	3



リュウグウの想定外の環境に対処しつつも、事前に計画したスケジュール、燃料・人員等のリソース範囲内で、近傍運用を完遂した。



## 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA) 工学的成果



### 7つの世界初を達成

1. 小型探査ロボットによる小天体表面の移動探査
2. 複数の探査ロボットの小天体上への投下・展開
3. 天体着陸精度60cmの実現
4. 人工クレーターの作成とその過程・前後の詳細観測
5. 同一天体2地点への着陸
6. 地球圏外の天体の地下物質へのアクセス
7. 最小・複数の小天体周回人工衛星の実現



# 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)

## はやぶさ2が成し遂げた7つの「世界初」



1. 小型探査ロボットによる小天体表面の移動探査
2. 複数探査ロボットの小天体上への投下・展開

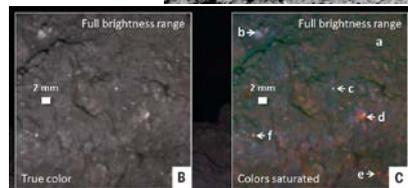
ONC-W2が撮影した  
分離直後のMASCOT



CAM-Hが捉えた第1回  
タッチダウンの瞬間



MINERVA-II1A  
が撮影した  
リュウグウの  
地表



MASCOTの観測画像



第2回タッチダウン地点と精度

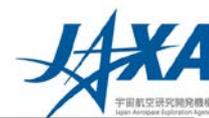
### 3. 天体着陸精度60cmの実現

MINERVA-II1Aが撮影した「はやぶさ2」



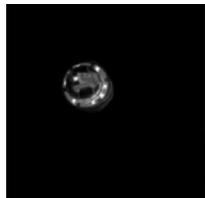
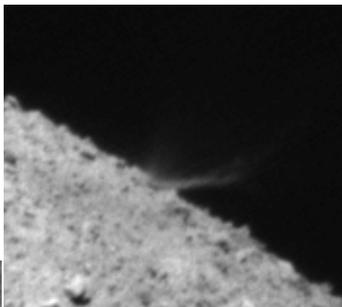
# 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)

## はやぶさ2が成し遂げた7つの「世界初」

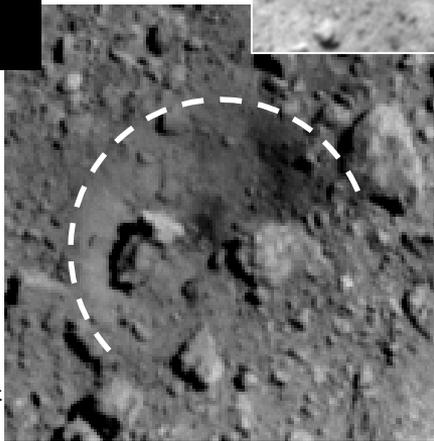


- 4. 人工クレーターの作成とその過程の観測
- 5. 同一天体2地点への着陸
- 6. 地球圏外の天体の地下物質へのアクセス

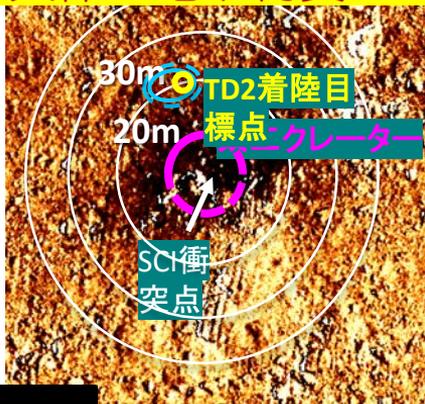
DCAM3が撮影したインパクトの瞬間



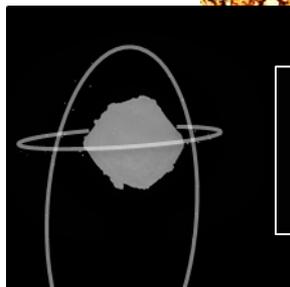
ONC-W1が撮影した分離直後のSCI



SCIにより作られた人工クレーター



人工クレーターまわりのイジェクタ堆積状況



リュウグウを周回する2つのターゲットマーカ



ONC-W2が撮影した分離直後のMINERVA-II2

第2回タッチダウン地点周辺の地形



SCIクレーター

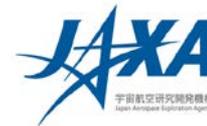
サンプリング点

ターゲットマーカ

## 7. 最小・複数の小天体周回人工衛星の実現



## 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)



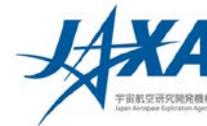
### JAXA-NEC協業体制でのNECの大きな貢献

- JAXA-NECは運用検討において密な検討体制を構築し、検討を進めてきた。  
JAXA近傍フェーズ運用検討チームとNECシステムチームとのやりとり: メール約8,000通
  - FY2015: SWBY運用、近傍フェーズスケジュール成立性検討
  - FY2016: 各種近傍フェーズ運用詳細化, 地上系ツール改修
  - FY2017: コンティジェンシー検討、着陸点選定(LSS)訓練、実時間管制(RIO)訓練
  - FY2018、2019: 実リュウグウへの対応
- JAXA-NECは役割分担の明確化の上、相互の役割がオーバーラップするように相互チェックを行い、それぞれの特性を活かしてお互いを補完し、挑戦的かつ信頼性の高い運用手法を構築できた。

	JAXA	NEC
ドキュメント管理	包絡的	緻密
スケジュール管理	フレキシブル	厳格
計画修正・方針変更提案	積極的	堅実(消極的ではない)



## 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)



### JAXA-NEC協業体制でのNECの大きな貢献

- システムメーカーとして探査機のことを知り尽くしている。
  - 探査機状態を一瞬で把握できる。不具合にもすぐ対処
- 緻密な計画文書の作成と変更管理
  - 膨大な運用計画書の作成・管理と迅速な改版
- 膨大で複雑な手順の作成、レビュー
  - TD1手順書行数: 8万行以上、降下運用全体で120万行以上の手順書
  - 確実な手順レビュー(手順書確認 JAXAとNECで合計1,000件以上の相互チェック)
- 運用実施に向けた運用準備の厳格な管理
  - JAXAからの情報提供の時期に対してスケジュール管理
- 同じ土俵での議論で、ONE TEAMを構築
  - 現実的な立場から、できないことはきっちりとNOといえる関係



# 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)



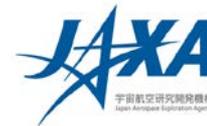
## JAXA-NEC協業の実例

### 第1回タッチダウンに向けての準備

- リュウグウの平坦領域が少ないことから、JAXA-NEC双方が高い壁(困難さ)を認識し、安全に確実な方法を模索、当初計画から大幅に方針転換
    - TMを事前分離する方針
    - 必要な安全性・精度を確保するため、事前計測した地形情報に基づき、LRFの測距値を“騙す”運用を実施
      - ソフトウェアを従来の使い方と異なる方法で使用する大胆な方針転換
- 2019年の初めにタッチダウン運用を行うために、スピード感ある変更を実施
- 2018年12月27日にJAXA側が当該手法を発見し提案
  - NECが即座にその提案を咀嚼しシミュレーションを実施、実現可能性を示す
  - 2019年1月7日には方針決定
  - 2月22日の運用直前までJAXA-NEC双方でシミュレーション結果の確認



## 2. 小惑星近傍運用総括 (JAXA)



### JAXA-NEC協業の実例

- 【訓練】 NECが作成する計画案はほぼ完璧。その穴は容易には見つからない。訓練はそれをあぶり出す手段でもあった。訓練を通じてJAXAから適切なフィードバックができたとともに、NEC自らも改善に気づける機会となった。
- 【着陸成立性検討】 TD1を成立させるためにJAXAが示す方針は二転三転した。当初は、LRF障害物検知の強化を指示、その次は複数ターゲットマーカを使用した手法、最後が現行のTD方式。これらにNECは臨機応変に対応。探査機の制約を厳密に守りながらも、当初計画に拘泥しない極めてフレキシブルな対応をしていただいた。
- 【第1回タッチダウン】 実運用に際しても、JAXA-NECは互いの責任所掌を正確に把握し必要な決断を厭わなかった。TD1の際に、5時間遅れで運用続行した決断の半分は、NECの英断によるもの。
- 【第2回タッチダウン】 レンズ曇り対策は厳密な対処を迫られた。TD2は当初6月末に実行を予定しておりNECはそれに必要な全準備を間に合わせた。しかしJAXA-NECの現場メンバーの疲労がピークに達しているを見て、TD2までの残りの作業を冷静にこなす余裕が必要とJAXAが判断。結果としてTD2の実施日は7月11日となった。互いの表情が見える状態で作業を進めていたことが最終的な成功へと繋がった。
- 【TD1/TD2成功時のNECの反応】 「はやぶさ2」のNECメンバーに加えて、「はやぶさ」時代の多くのNECシニアメンバーから喜びとお祝いのメッセージを頂いた。「はやぶさ2」が、「はやぶさ」の残した宿題を、「はやぶさ」のマネジメントの良い部分を踏襲する形で完璧に果たせたことは、探査技術の進化の点で大きな収穫。



# 3. 小惑星近傍運用総括(NEC)





## 4. 業績(論文、表彰)

※小惑星近傍運用期間(2018年6月以降について)

### ■論文:

- サイエンス誌掲載:4件、Nature Astronomy:1件、主要論文誌掲載:11件
- 現在、投稿中の論文多数

### ■表彰

- 合計8件
- 表彰団体名

Aviation Week & Space Technology、日本航空宇宙学会、公益財団法人  
東レ科学振興会、クールジャパン協議会、Airbus社、日本SFファングルー  
プ連合会、日本ロボット学会、電子情報通信学会DC研究会

※参考資料参照



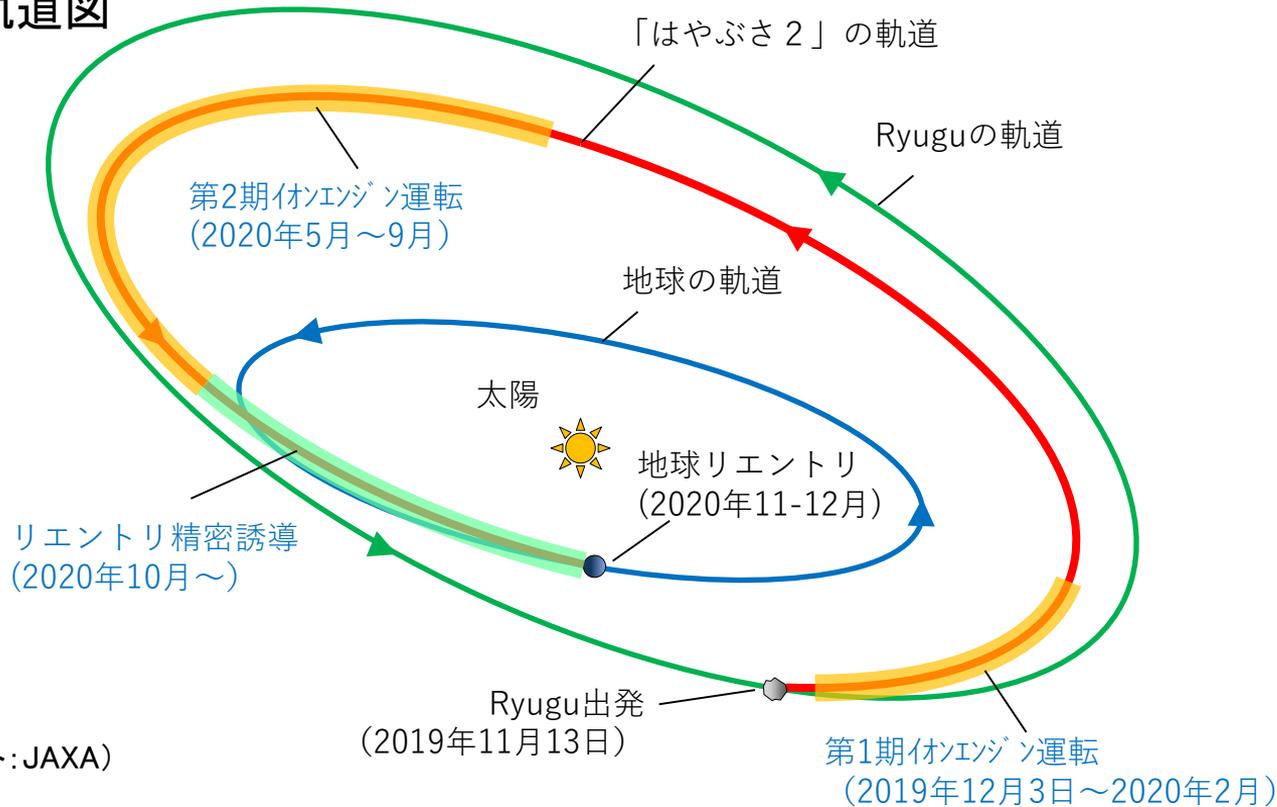
# 5. 帰還巡航運用計画

- 「はやぶさ2」の現在の状態
  - イオンエンジンスラストA、C、Dの健全性が確認された。(2019年11月20日～29日)  
※スラストBは温存
  - 本日(2019年12月19日)現在、「はやぶさ2」のリュウグウからの距離は45,000kmまで離れた。
- 帰還フェーズの軌道制御
  - 2期のイオンエンジン運転と、リエントリ精密誘導からなる。
  - 第1期イオンエンジン運転期間：2019年12月3日～2020年2月初旬
  - 第2期イオンエンジン運転期間：2020年5月～2020年9月
  - リエントリ精密誘導期間：2020年10月～リエントリまで
  - 上記以外の期間は弾道飛行。必要に応じて高速データリンクのために地球指向姿勢をとる。
- イオンエンジン運転計画
  - 第1期イオンエンジン運転期間：約600時間(使用スラスト数 3台→2台、総加速量 約100m/s)
  - 第2期イオンエンジン運転期間：約1,900時間(使用スラスト数 1台→2台、総加速量 約150m/s)



# 5. 帰還巡航運用計画

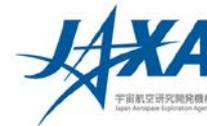
## • 帰還フェーズ軌道図



(画像クレジット: JAXA)



## 6. 今後の予定



### ■ 運用の予定

2020年2月初旬まで

イオンエンジン運用

### ■ 記者説明会等

2020年2月(TBD)

記者説明会@東京事務所



# 参考資料



# Science, Nature 論文リスト



- R. Jaumann, et al., Images from the surface of asteroid Ryugu show rocks similar to carbonaceous chondrite meteorites, *Science* 23 Aug 2019, Vol. 365, Issue 6455, pp. 817-820
- M. Grott, et al., High porosity boulders identified on C-type asteroid (162173) Ryugu, *Nature Astronomy* volume 3, pages 971–976, 2019
- S. Sugita, et al., The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes, *Science* 19 Apr 2019: Vol. 364, Issue 6437, eaaw0422
- S. Watanabe, et al., Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile, *Science* 19 Apr 2019: Vol. 364, Issue 6437, pp. 268-272
- K. Kitazato, et al., The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy, *Science* 19 Apr 2019: Vol. 364, Issue 6437, pp. 272-275



# 表彰リスト



表彰年月	表彰された人、グループ名、所属	表彰された内容	表彰した団体名	表彰のタイトル
2019/11	檜原弘樹, 佐野淳平, 益田哲也, 大嶽久志, 岡田達明, 尾川順子, 津田雄一	はやぶさ2搭載光学航法機器の信頼性評価 ～リソース制約を満たす高信頼性システムの軌道上実証～	電子情報通信学会DC研究会	第6回研究会最優秀講演賞
2019/09	吉光徹雄、久保田孝	小惑星探査ローバ「ミネルバ2」の開発	日本ロボット学会	2019年度実用化技術賞
2019/07	「はやぶさ2」プロジェクト	MINERVA- II 1のリュウグウ着地及び小惑星移動探査	日本SFファングループ連合会議	2019年第50回星雲賞 自由部門
2019/06	「はやぶさ2」プロジェクト	MASCOT搭載カメラ	Airbus社	Airbus Space Day 「はやぶさ2特別表彰」
2019/05	JAXA(宇宙航空研究開発機構)「はやぶさ」「はやぶさ2」	精緻な技術の結集した宇宙機器はまさに日本人らしいクール！	クールジャパン協議会	COOL JAPAN AWARD 2019【一般部門】アウトバウンドカテゴリー
2019/03	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 所長 國中 均	マイクロ波放電式イオンエンジンの研究開発と太陽系探査の推進	公益財団法人東レ科学振興会	平成30年度(第59回)東レ科学技術賞
2019/03	宇宙航空研究開発機構 はやぶさ2プロジェクトチーム(代表者:プロジェクトマネージャ 津田 雄一)	はやぶさ2による小天体ランデブーのための深宇宙航行技術の進展と小惑星Ryuguへの到着	日本航空宇宙学会	技術賞, プロジェクト部門
2019/03	Japan Aerospace Exploration Agency Hayabusa2	Japan's Hayabusa2 sample-return mission, which rendezvoused with the asteroid Ryugu in June 2018, has made a promising start, with the successful deployment and operation of three mini-rovers—one from the DLR and Onera—ahead of its first landing planned in early 2019.	Aviation Week & Space Technology	Aviation Week Network's 62nd Annual Laureate Awards, Space: Technology & Innovation