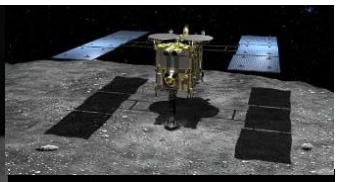
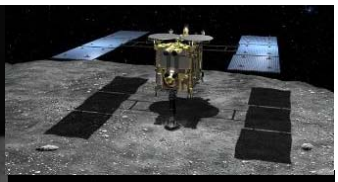
小惑星探査機「はやぶさ2」が挑む人類未踏の探査



津田 雄一
准教授，はやぶさ2プロジェクトマネージャ
JAXA宇宙科学研究所

Unprecedented Research by Asteroid Explorer Hayabusa2



Yuichi Tsuda, Ph.D
Associate Professor, Hayabusa2 Project Manager
Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

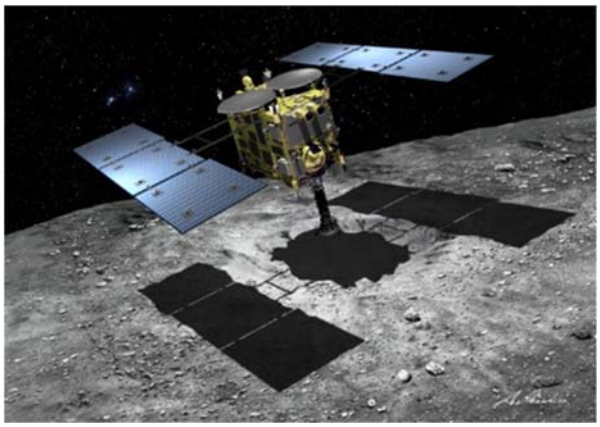
「はやぶさ2」概要

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

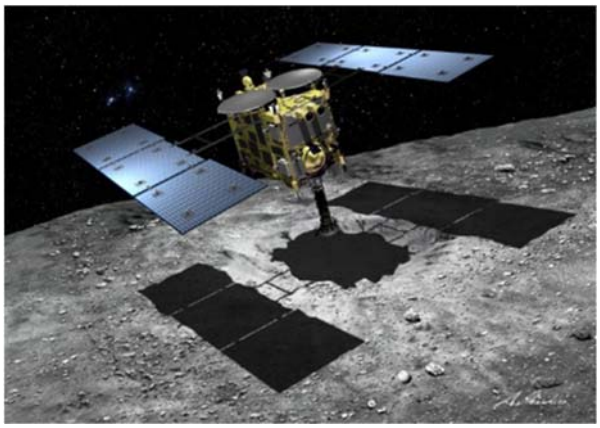
Overview of Hayabusa2

Objective
We will explore and sample the C-type asteroid Ryugu, which is a more primitive type than the S-type asteroid Itokawa that Hayabusa explored, and elucidate interactions between minerals, water, and organic matter in the primitive solar system. By doing so, we will learn about the origin and evolution of Earth, the oceans, and life, and maintain and develop the technologies for deep-space return exploration (as demonstrated with Hayabusa), a field in which Japan leads the world.

Expected results and effects
・By exploring a C-type asteroid, which is rich in water and organic materials, we will clarify interactions between the building blocks of Earth and the evolution of its oceans and life, thereby developing solar system science.
・ Japan will further its worldwide lead in this field by taking on the new challenge of obtaining samples from a crater produced by an impacting device.
・We will establish stable technologies for return exploration of solar-system bodies.

Features:
・World's first sample return mission to a C-type asteroid.
・World's first attempt at a rendezvous with an asteroid and performance of observation before and after projectile impact from an impactor.
・Comparison with results from Hayabusa will allow deeper understanding of the distribution, origins, and evolution of materials in the solar system.

International positioning:
・Japan is a leader in the field of primitive body exploration, and visiting a type-C asteroid marks a new accomplishment.
・This mission builds on the originality and successes of the Hayabusa mission. In addition to developing planetary science and solar system exploration technologies in Japan, this mission develops new frontiers in exploration of primitive heavenly bodies.
・NASA too is conducting an asteroid sample return mission, OSIRIS-REx (launch: 2016; asteroid arrival: 2018; Earth return: 2023). We will exchange samples and otherwise promote scientific exchange, and expect further scientific findings through comparison and investigation of the results from both missions.



(Illustration: Akihiro Ikeshita)

Hayabusa 2 primary specifications

Mass	Approx. 609 kg
Launch	3 Dec 2014
Mission	Asteroid return
Arrival	2018
Earth return	2020
Stay at asteroid	Approx. 18 months
Target body	Near-Earth asteroid Ryugu

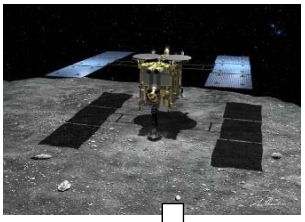
Primary instruments
Sampling mechanism, re-entry capsule, optical cameras, laser altimeter, scientific observation equipment (near-infrared, thermal infrared), impactor, small rovers

ミッションの流れ概要

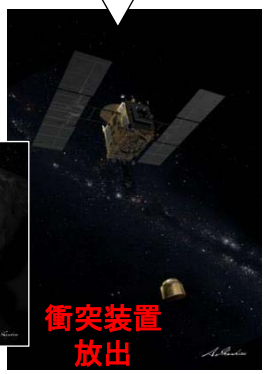
打上げ
2014年12月3日

▲
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



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。



衝突装置放出

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。

小惑星出発
2019年11-12月

人工クレーターの生成

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。

地球帰還
2020年末ごろ

サンプル分析

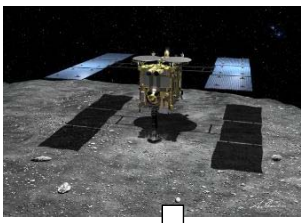
（イラスト 池下章裕氏）

Outline of mission flow

Launch
December 3rd, 2014

▲
Earth swing-by
December 3rd, 2015

Asteroid arrival
June 27th, 2018

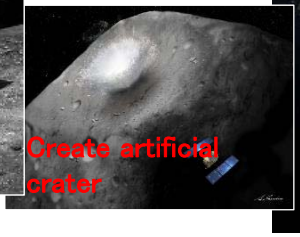


Examination of asteroid via remote sensing observations, followed by the release of the small lander and rovers. Obtain samples from the asteroid surface.

Release impactor

Create an artificial crater on the asteroid surface using an impact device.

Departure from the asteroid
November – December, 2019



Create artificial crater

After confirming site safety, touchdown to the crater to collect subsurface material

Return to Earth
End of 2020

Sample analysis

(Illustration: Akihiro

サンプルリターンの科学

Sample Return Science

はやぶさ2の意義

科学

宇宙探査技術

惑星防衛

宇宙資源

はやぶさ2が見据えるのは，科学に留まらない小天体上の活動

着地 / 移動 / 採集 / 掘削

Significance of Hayabusa2

Science

Space Exploration Engineering

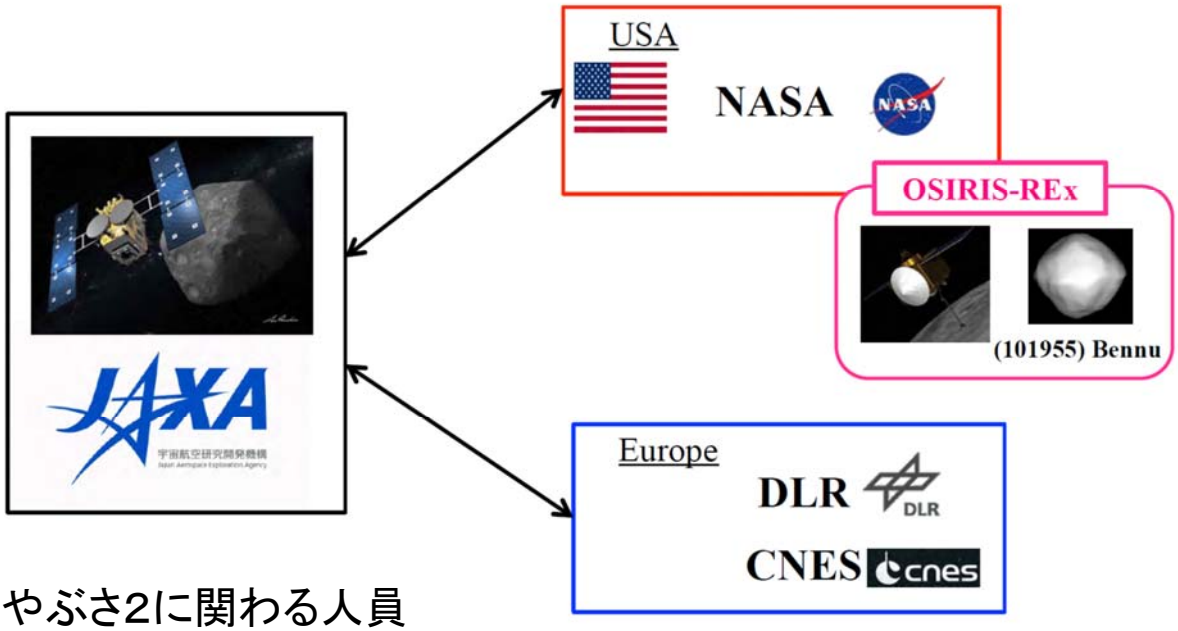
Planetary Defense

Planetary Resource

Hayabusa2 is pushing forward the boundaries of small body surface activity

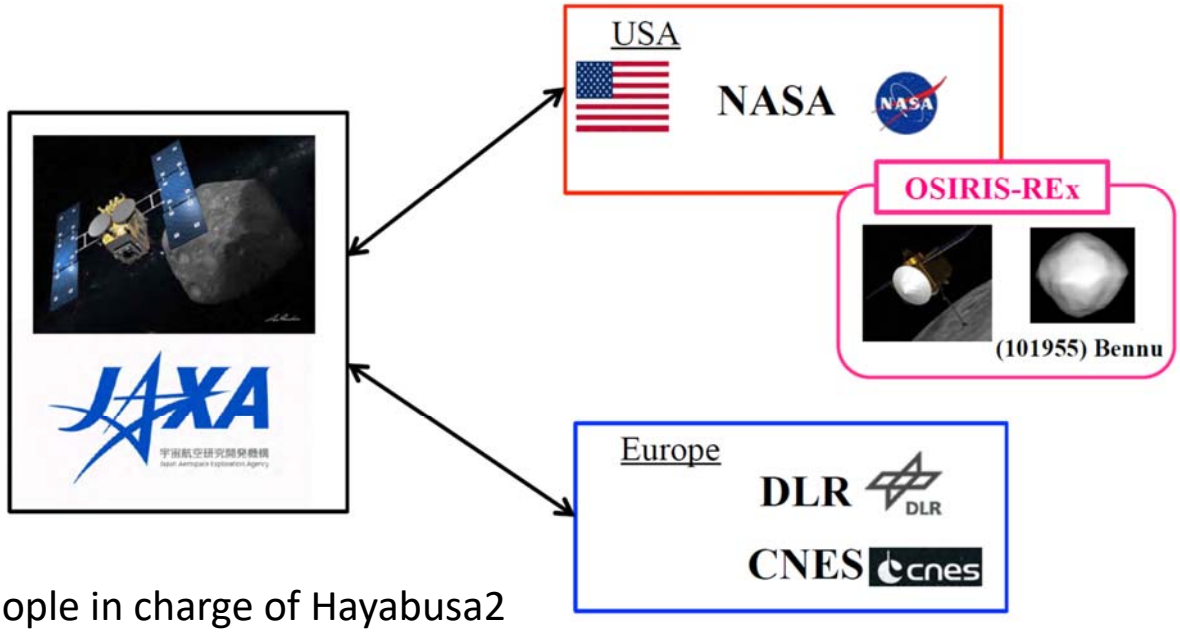
ACCESS / ROVING / SAMPLING / IMPACTING

国際協力体制



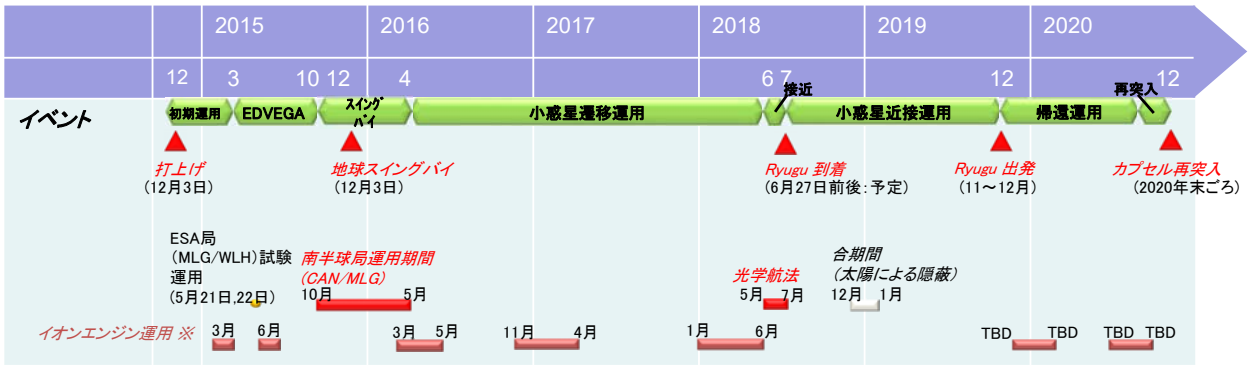
はやぶさ2に関わる人員
国内外科学者　320
運用スタッフ　50
技術スタッフ　+200

International Collaboration

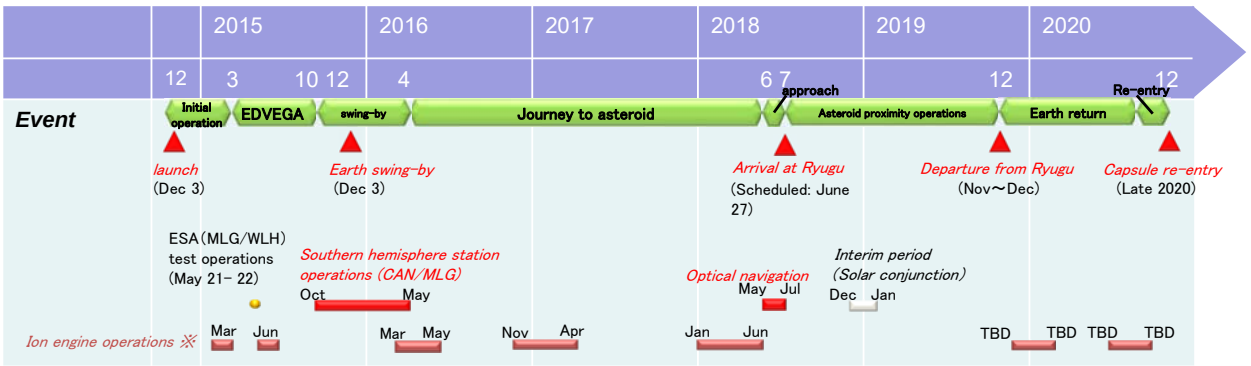


People in charge of Hayabusa2
320 International Scientists
50 Operation Staff
+200 Engineering Staff

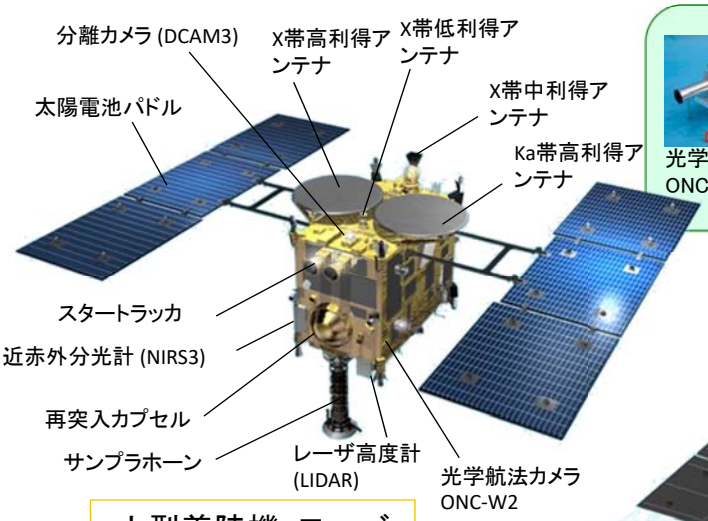
ミッションスケジュール

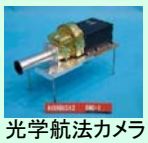


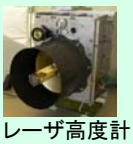
Project schedule

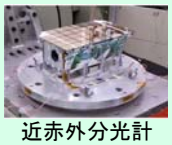


探査機概要



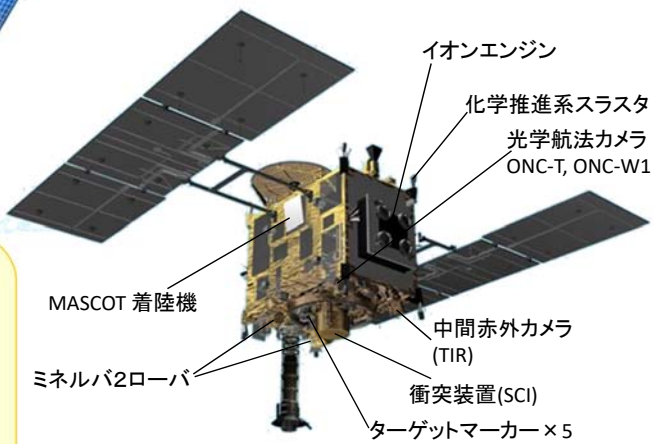

光学航法カメラ ONC−T


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

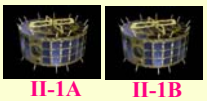


小型着陸機・ローバ

MASCOT


DLRとCNES製作

ミネルバ2

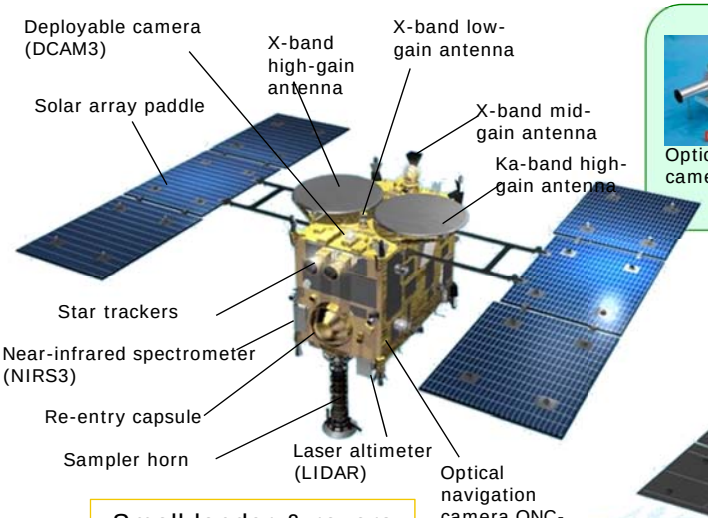

II-1A　II-1B

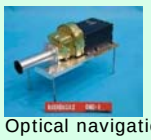

II-2

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

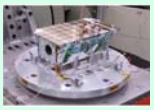
大きさ: 1m×1.6m×1.25m (本体)
太陽電池パドル展開幅6m
重さ　: 609kg (燃料込み)

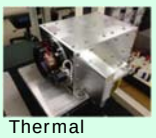
Primary spacecraft components



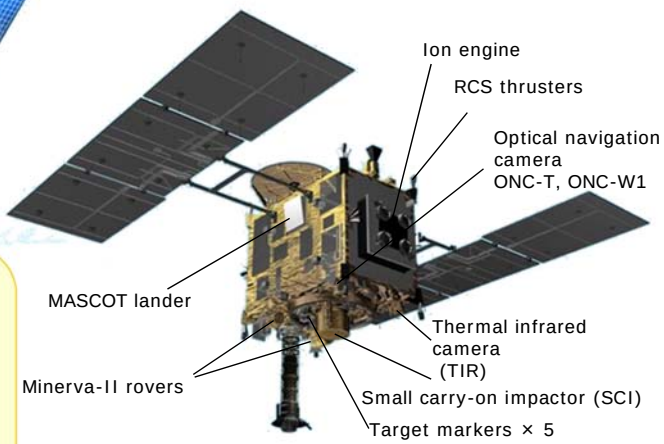

Optical navigation camera, ONC-T


Laser altimeter, LIDAR


Near-infrared spectrometer, NIRS3


Thermal infrared camera, TIR

Scientific observation equipment



Small lander & rovers

MASCOT


Built by DLR and CNES

Minerva 2

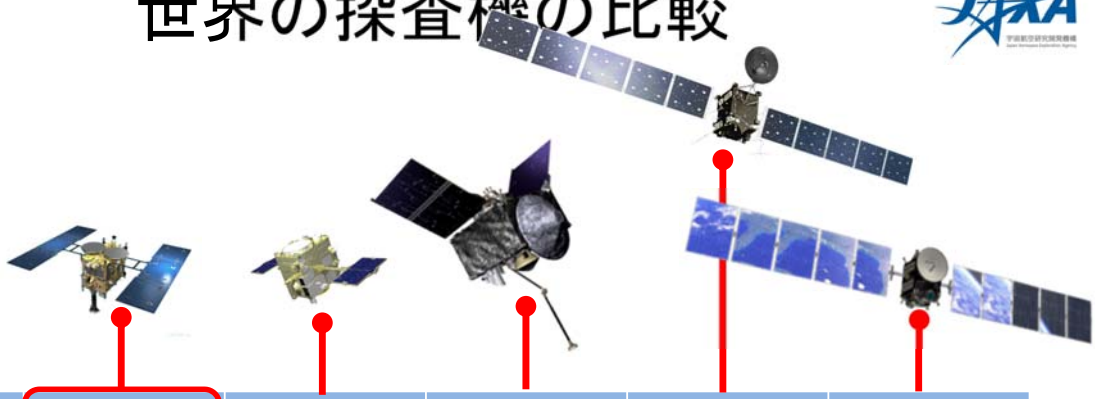

II-1A　II-1B


II-2

II-1: By the JAXA Minerva-II team
II-2: By Tohoku Univ. & the Minerva-II Consortium

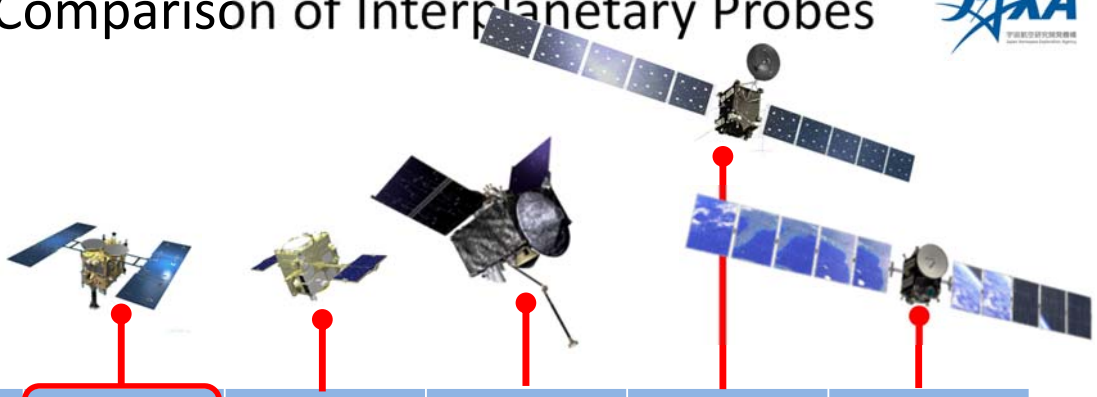
Size: 1 ×1. 6×1. 25 m (main body)
Solar paddle deployed width 6 m
Mass　: 609 kg (incl. fuel)

世界の探査機の比較



	はやぶさ2	あかつき	オシリスレックス	ロゼッタ	ドーン
開発国	日本	日本	アメリカ	ヨーロッパ	アメリカ
目的天体	小惑星	金星	小惑星	彗星	準惑星
ミッションタイプ	往復	片道	往復	片道	片道
質量 (燃料質量)	609kg (60kg)	518kg (200kg)	2110kg (1095kg)	3000kg (1800kg)	1200kg (275kg)
加速能力	3km/s	1.5km/s	2km/s	2.3km/s	10km/s
観測機器	14 遠隔観測 サンプリング 着陸機 クレータ生成	6 遠隔観測	8 遠隔観測 サンプリング	11 遠隔観測 着陸機	3 遠隔観測

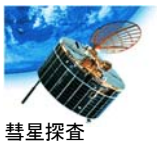
Comparison of Interplanetary Probes

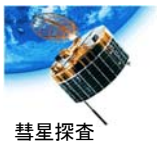


	Hauabusa2	Akatsuki	OSIRIS-REx	Rosetta	Dawn
Country	Japan	Japan	USA	Europe	USA
Destination	Asteroid	Venus	Asteroid	Comet	Dwarf Planet
Mission Type	Round-Trip	One-way	Round-Trip	One-way	One-way
Total Mass (Fuel Mass)	609kg (60kg)	518kg (200kg)	2110kg (1095kg)	3000kg (1800kg)	1200kg (275kg)
Acceleration Capability	3km/s	1.5km/s	2km/s	2.3km/s	10km/s
Onboard Instruments	14 Remote Science Sampling Lander/Rover Crater Forming	6 Remote Science	8 Remote Science Sampling	11 Remote Science Lander	3 Remote Science

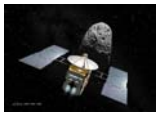
日本の探査機は … お弁当箱スタイル

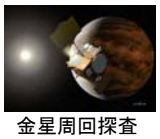
お弁当は…	はやぶさ２は…
✓ 彩り豊か	多機能
✓ 栄養満点	高機能
✓ コンパクト	小型
✓ お財布に優しい	低コスト
✓ 愛情いっぱい	想いが一杯!

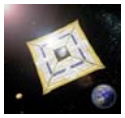

彗星探査
さきがけ, 1985

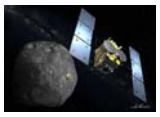

彗星探査
SUISEI, 1985

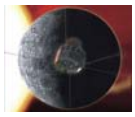

火星周回探査
のぞみ, 1998


小惑星往復探査
はやぶさ, 2003


金星周回探査
あかつき, 2010


ソーラーセイル実証
イカロス, 2010


小惑星往復探査
はやぶさ2, 2014


水星周回探査
みお, (2018)

JAXAの太陽系探査ミッションの系譜

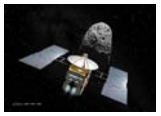
Japanese Spaceprobe is Bento (Lunch Box) Style

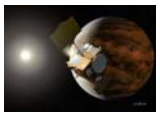
Bento is…	Hayabusa2 is…
✓ Colorful	Various Function
✓ Nutrient-rich	High Performance
✓ Compact	Compact
✓ Wallet-friendly	Low Cost
✓ Full of Love	Full of Passion!

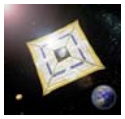

Comet Explorer
SAKIGAKE, 1985


Comet Explorer
SUISEI, 1985

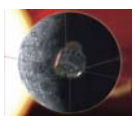

Mars Orbiter
NOZOMI, 1998


Asteroid S&R
HAYABUSA, 2003


Venus Orbiter
AKATSUKI, 2010

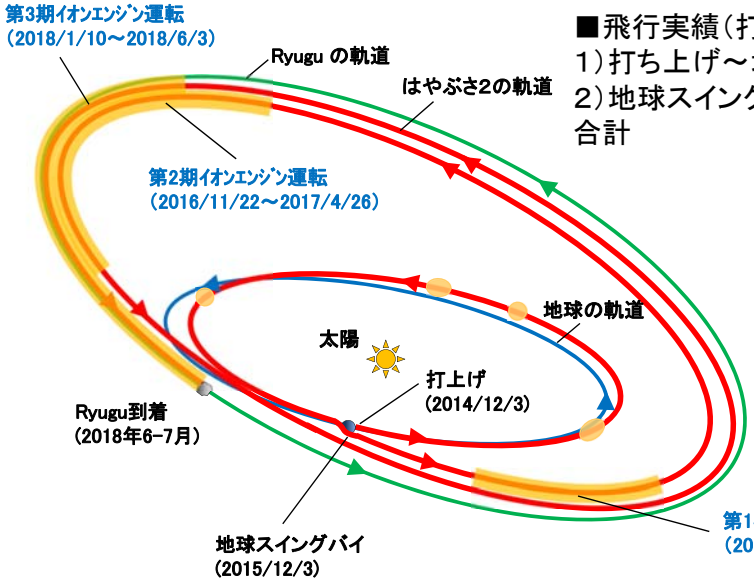

Solar Sail Demo.
IKAROS, 2010


Asteroid S&R
HAYABUSA2, 2014


Mercury Orbiter
MIO, (2018)

JAXA's interplanetary mission heritage

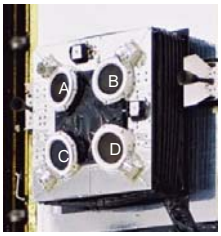
往路飛行実績(地球→リュウグウ)



■飛行実績(打ち上げ～リュウグウ到着)

1)打ち上げ～地球スイングバイ	1.0年,	9.0億km
2)地球スイングバイ～小惑星到着	2.5年,	22.0億km
合計	3.5年,	31.0億km

噴射中のイオンエンジン



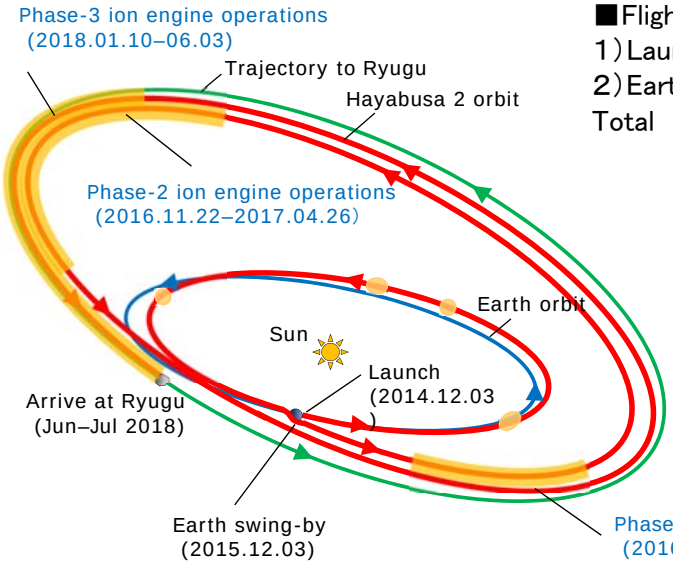
イオンエンジンスラスタ部

■イオンエンジン実績

のべ運転時間	18073時間(エンジン3基分合計)
総加速量	1015m/s
消費燃料	24kg (36%)

Interplanetary Cruise (Earth to Ryugu)

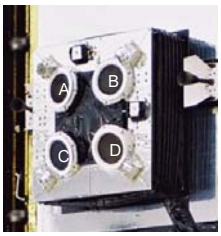
Summary of forward cruise ion engine operation



■Flight Record(Launch to Ryugu Arrival)

1)Launch – Earth Swingby	1.0yr,	900M km
2)Earth Swingby – Arrival	2.5yr,	2,200M km
Total	3.5yr,	3,100M km

Ion engine in operation



Ion engine thrusters of Hayabusa2

■Ion Engine In-Orbit Record

Total Operation Time	18,073hrs(Three thrusters total)
Total Velocity Increment	1,015m/s
Consumed Fuel	24kg (36%)

リュウグウ到着

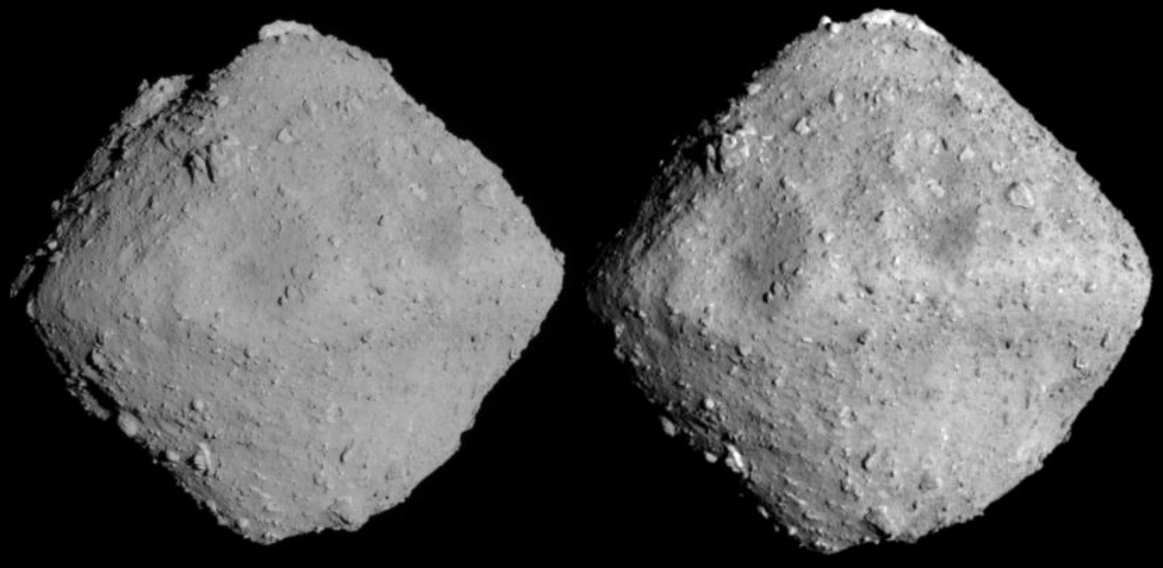
2018年6月27日

Ryugu arrival

June 27, 2018

これがリュウグウ

・きわめて暗い表面を持つ．自転軸方向は軌道面に垂直に近い
・クレーター，多数の岩塊（130 mの大岩含む），溝状地形など



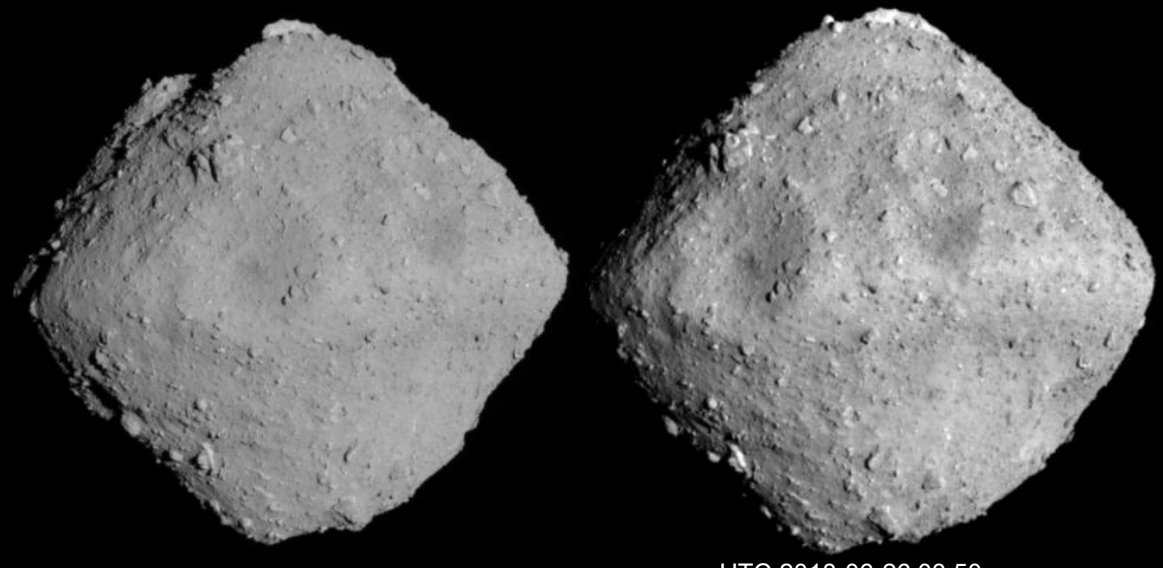
UTC 2018−06−30 14:13

UTC 2018-06-26 03:50

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

This is Ryugu

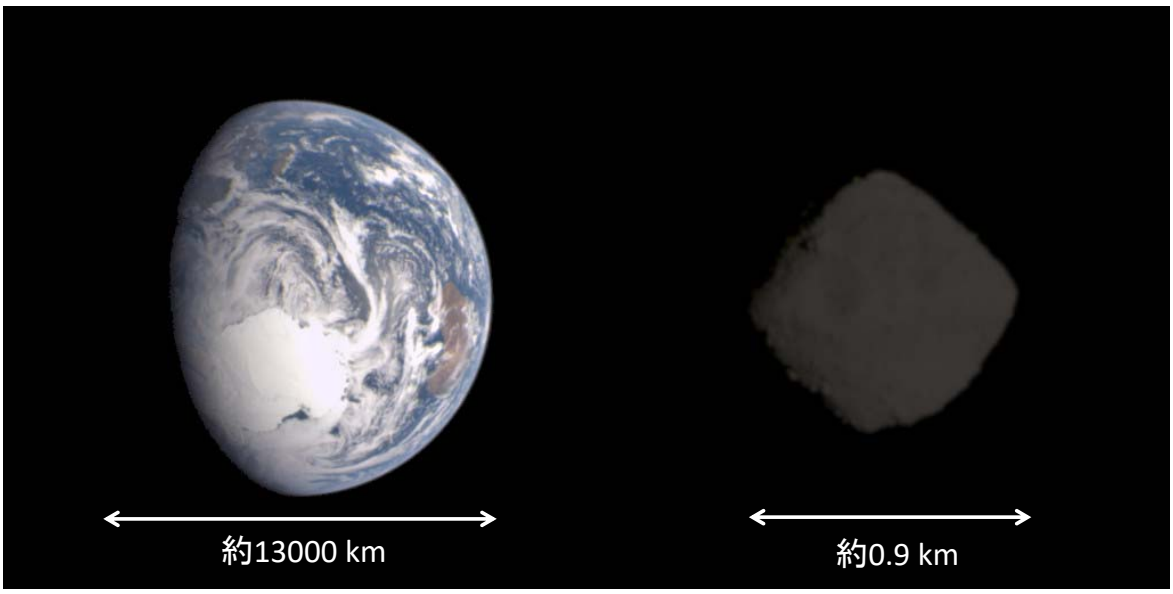
・The surface is very dark. The axis of rotation is nearly perpendicular to orbital plane.
・Features include craters, numerous boulders (including rocks up to 130m in size) and a grooved terrain.



UTC 2018−06−30 14:13

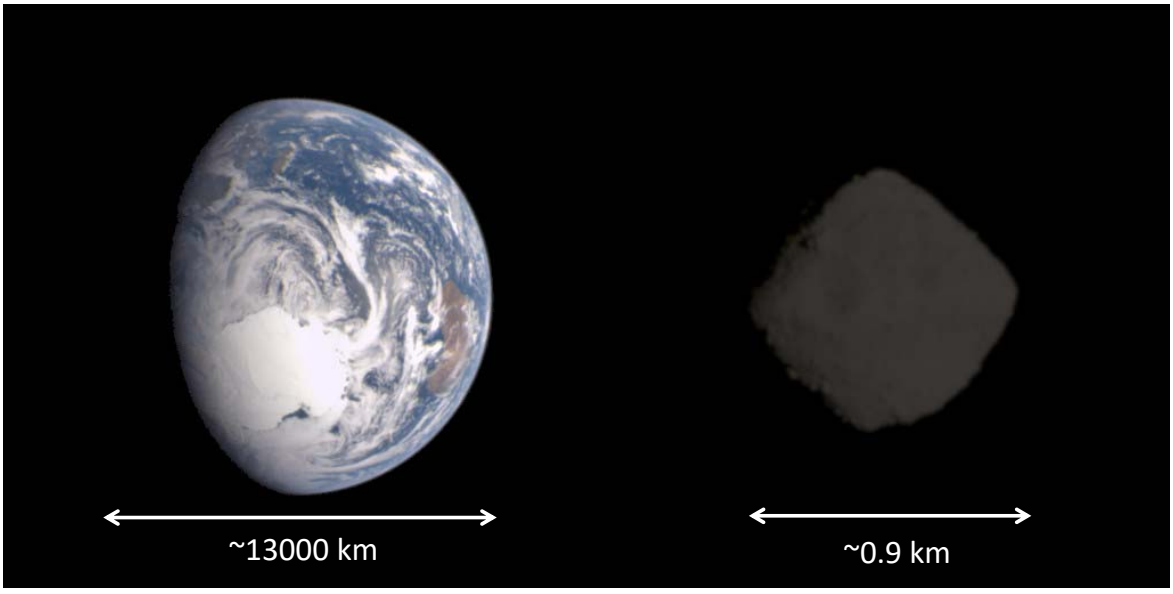
UTC 2018-06-26 03:50

リュウグウのカラー画像



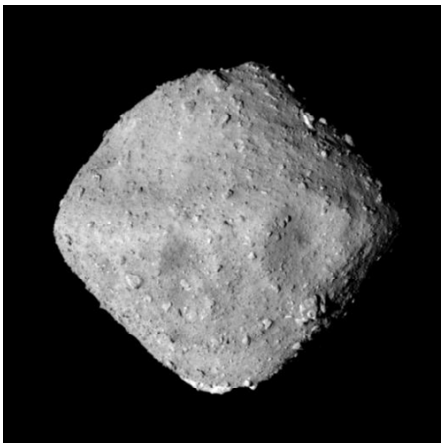
ONC-Tによって撮影された地球とリュウグウ。地球は、地球スイングバイの直後（2015年12月4日）に撮影されたもの。リュウグウは、2018年6月21日の多バンド画像からb,v,wを用いて天然色化したもの。
クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

Color image of Ryugu



The Earth and Ryugu photographed by the ONC-T. The Earth image was taken immediately after the Earth swing-by (Dec. 4, 2015). The natural color image of Ryugu was created using the multiband image taken on June 21, 2018 using the b, v and w filters.
Image credit: JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu, AIST.

リュウグウの科学的特徴

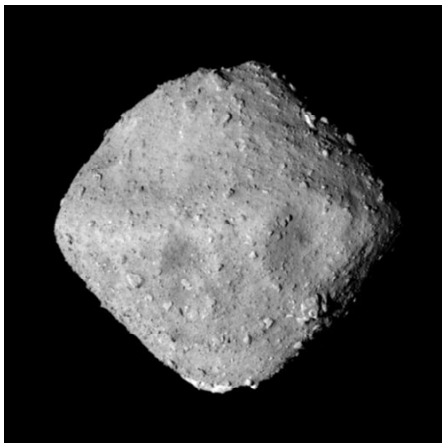


（©JAXA、東大など）

- 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（GM=約30 m^3s^{-2}）※
- 自転軸の向き: (λ, β) = (180°, −87°)
- 赤道傾斜角：約8°
- 自転周期：P = 7.63時間
- 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）

Scientific Features of Ryugu



（©JAXA、University of Tokyo & collaborators）

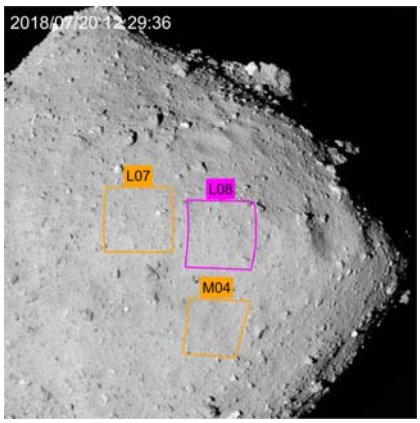
- Top shape with a very circular equatorial bulge
- Radius: mean ～450 m
  （equatorial ～500 m、polar ～440 m）
- Mass: ～450 million ton（GM～30 m^3s^{-2} ）※
- Rotation axis: (λ, β) = (180°, -87°)
- Obliquity: ～8°
- Rotation period：P = 7.63 hours
- Reflectance factor（v-band）：0.02
- Crater number density: as much as those on Itokawa and Eros
- Many boulders: the largest near the south pole is ~130 m across
- Optical spectra: flat spectra, bluer in equatorial bulge and poles
- NIR spectra: uniform flat (slightly redder) spectra with weak water absorption
- brightness temperature：strong roughness effect (flat diurnal Temperature variation), higher thermal inertia in the equatorial bulge

（※The gravity at the equator is eighty-thousandth of the Earth and a few times of Itokawa)

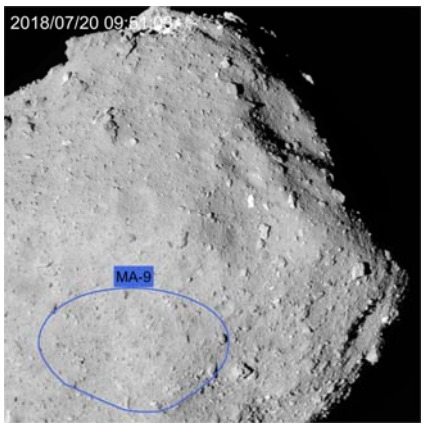
Selected landing site candidates

Determined landing site candidates
- Touchdown : L08 (backup : L07、M04)
- MASCOT : MA-9 *Landed on Oct.3!*
- MINERVA-II-1 : N6 *Landed on Sep.21!*

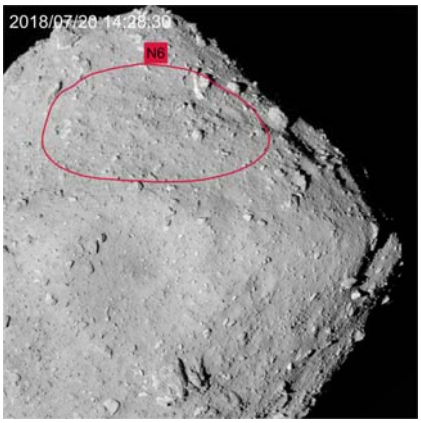
Touchdown



MASCOT



MINERVA-II-1

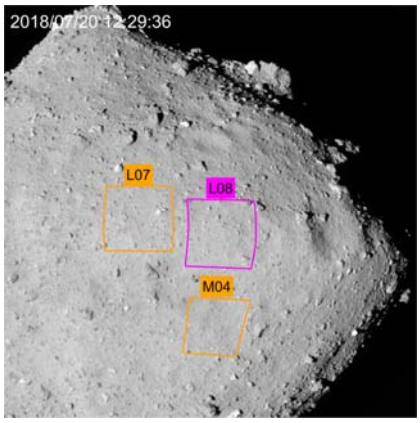


(©JAXA, University of Tokyo & collaborators)

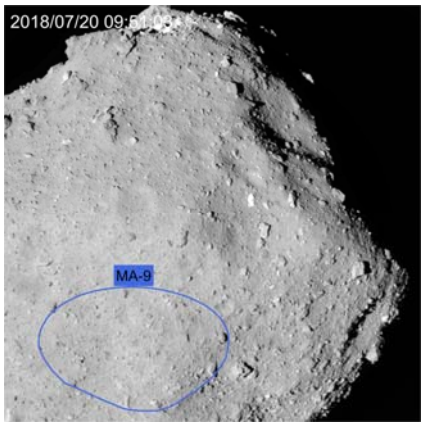
着地候補地点

決定された着地候補地点
- タッチダウン : L08（バックアップ：L07、M04）
- MASCOT : MA-9 *10/3 着陸成功！*
- MINERVA-II-1 : N6 *9/21着陸成功！*

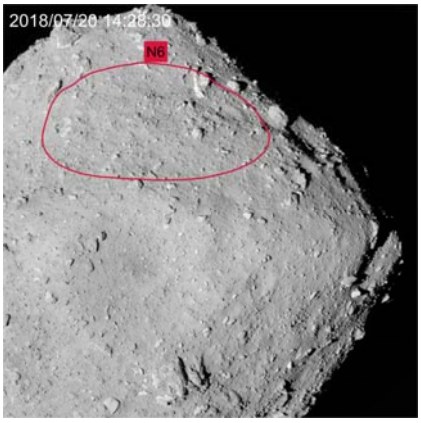
タッチダウン



MASCOT



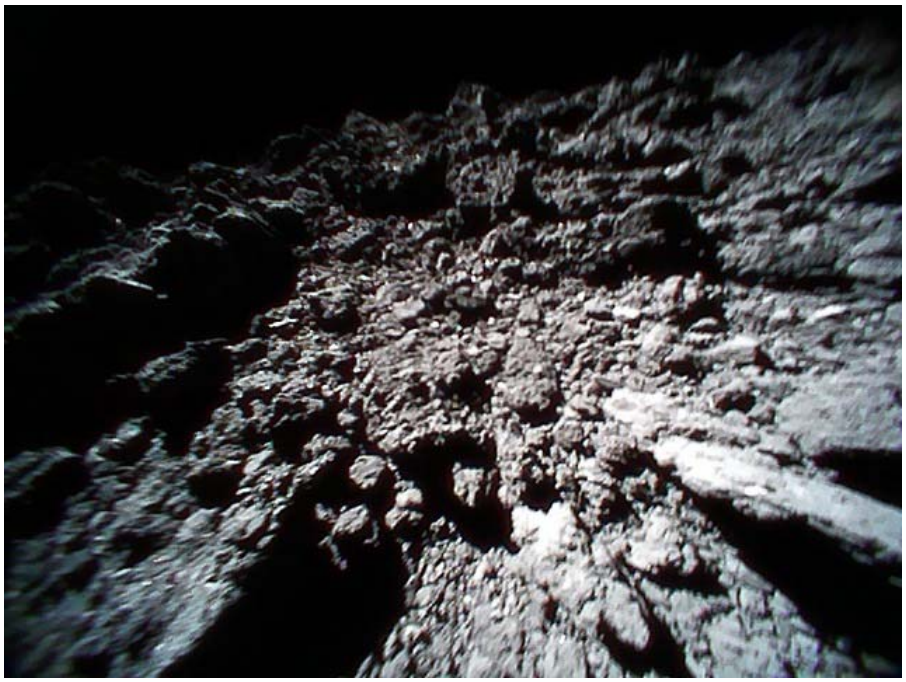
MINERVA-II-1



(©JAXA、東大など)

MINERVA-II1の表面探査

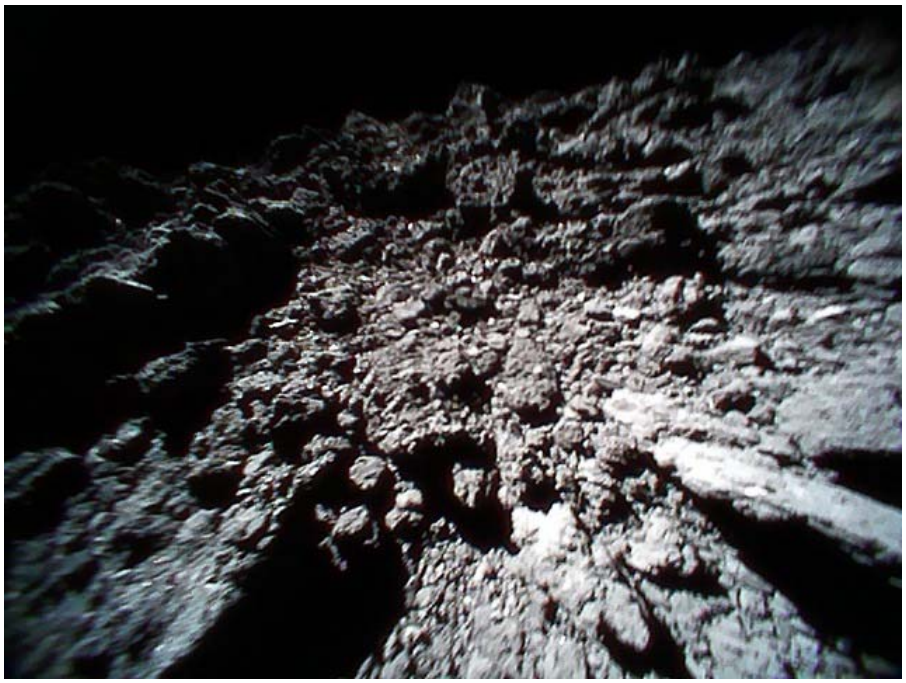
2機のローバーは，小惑星上で飛び跳ね，データを収集し，
定常的に探査機に情報を送っています．



（画像のクレジット：JAXA）

Surface Exploration by MINERVA-II1

Two rovers are hopping, collecting data, and constantly sending data back to the spacecraft.



（Image credit：JAXA）

MINERVA-II1の表面探査

Rover-1B動画撮影に成功

2018年9月23日10時
34分から11時48分
JSTまで15枚取得

（動画）

（クレジット：JAXA）

Surface Exploration by MINERVA-II1

Rover-1B successfully shot a movie

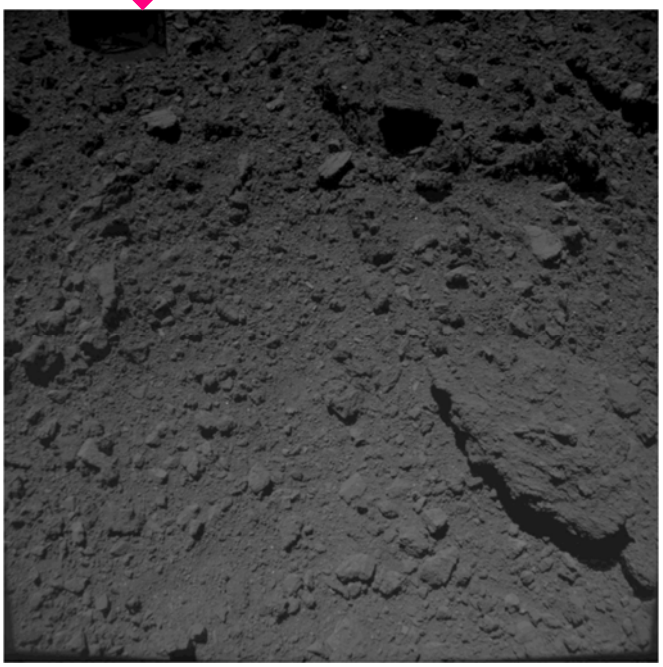
15 frames captured on
September 23, 2018
from 10:34 – 11:48
JST

（animation）

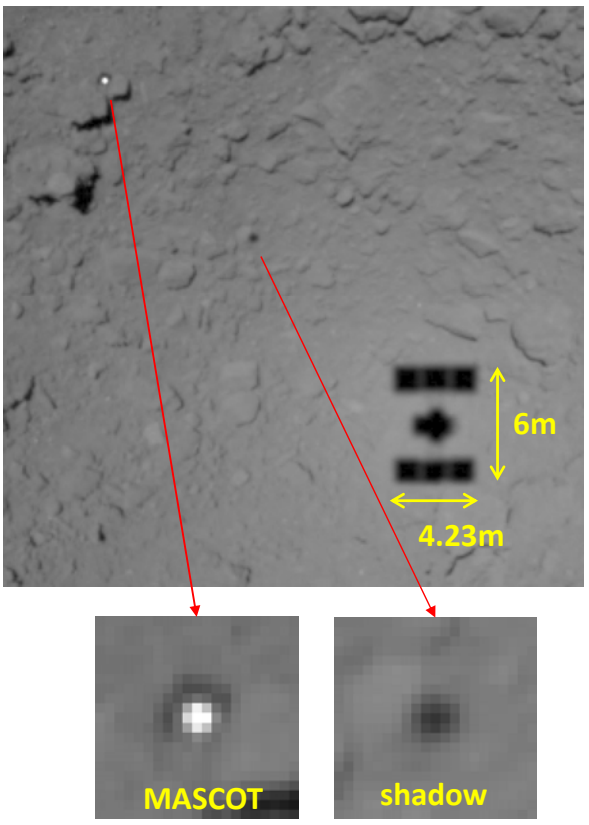
（credit：JAXA）

MASCOT分離降下運用

注目！

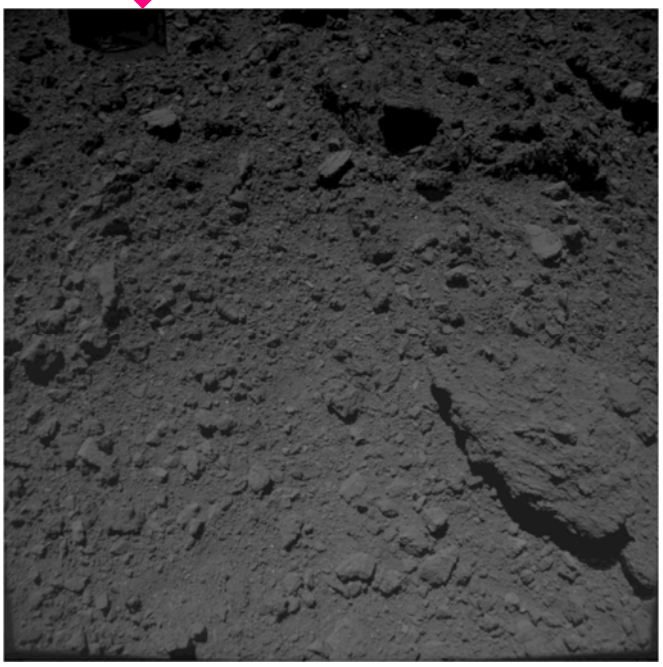


（画像クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研）

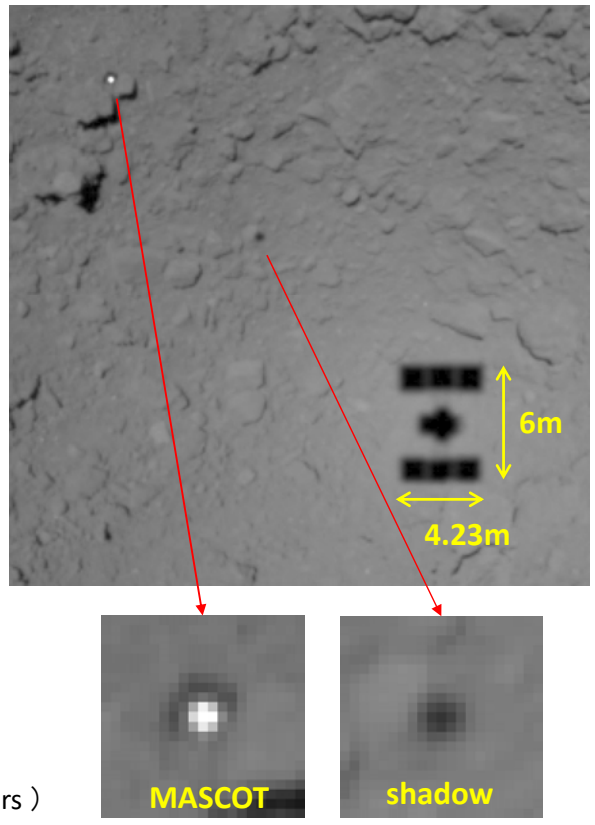


MASCOT Delivery Descent

Watch!



（Image Credit: JAXA、University of Tokyo & collaborators ）



MASCOT: 欧州での反応

IAC（国際宇宙会議）でのMASCOT運用を含む「はやぶさ2」の最新情報を紹介（2018年10月5日、ブレーメン・ドイツ）
写真撮影：藪田ひかる氏

MASCOTの記者会見

MASCOT's Path on the Asteroid Ryugu
Friday, October 12, 2018, 10:30am
DLR Capital Office Berlin
小惑星リュウグウ上のMASCOTの軌跡
2018年10月12日、17:30（日本時間）
DLR ベルリン

Dear MASCOT-team

2 days after the landing of MASCOT on Ryugu, and analyzing the first data and images, it is time for me to thank all of your for an outstanding job.

When we started the MASCOT-project 7 years ago, it was clear that it will become hard work to build, to integrate, and to test a small lander equipped with 4 instruments in only 2 1/2 years time. I know that all of you had been engaged very much over a long time before launch and later during cruise phase for landing preparation. I like to thank all of you, and in particular our colleagues and partners in JAXA and CNES, for this work which made a small spacecraft landing a great event in space. To my knowledge of today, all systems worked nicely and made it possible to record as scheduled which demonstrated a careful and high quality work of all contributors as well as a great team spirit.

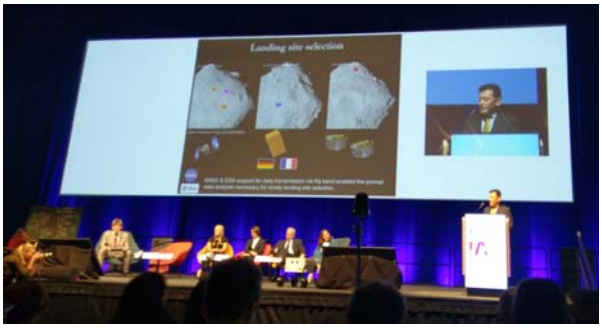
I am sure that the data recorded during the 17 hours operation on Ryugu's surface will become the basis of important scientific results.

Thank you again!

With regards
Hansjoerg Dittus

DLR理事 Hansjörg Dittus氏からのメッセージ

MASCOT: Response in Europe



MASCOT operation status introduced in IAC（International Astronautical Congress）（Oct.5, 2018, Bremen, Germany）
Photographed by Hikaru Yabuta

Press Conference by MASCOT Team

MASCOT's Path on the Asteroid Ryugu
Friday, October 12, 2018, 10:30am
DLR Capital Office Berlin
小惑星リュウグウ上のMASCOTの軌跡
Oct 12, 2018, 17:30JST @ DLR Berlin

Dear MASCOT-team

2 days after the landing of MASCOT on Ryugu, and analyzing the first data and images, it is time for me to thank all of your for an outstanding job.

When we started the MASCOT-project 7 years ago, it was clear that it will become hard work to build, to integrate, and to test a small lander equipped with 4 instruments in only 2 1/2 years time. I know that all of you had been engaged very much over a long time before launch and later during cruise phase for landing preparation. I like to thank all of you, and in particular our colleagues and partners in JAXA and CNES, for this work which made a small spacecraft landing a great event in space. To my knowledge of today, all systems worked nicely and made it possible to record as scheduled which demonstrated a careful and high quality work of all contributors as well as a great team spirit.

I am sure that the data recorded during the 17 hours operation on Ryugu's surface will become the basis of important scientific results.

Thank you again!

With regards
Hansjoerg Dittus

Message by DLR Board Member Hansjörg Dittus

ミッション達成状況

- ☑ リュウグウへの到達
- ☑ リュウグウの特性把握，地図づくり，重力計測
- ☑ ミネルバII-1ローバー2機の小惑星上への展開
- ☑ MASOT着陸機の小惑星上への展開
- ☐ 母船のタッチダウン
- ☐ クレーター生成
- ☐ ミネルバII-2ローバーの小惑星上への展開
- ☐ クレーターへの着陸* (可能な場合のみ実施)
- ☐ 地球帰還

Mission Accomplishments

- ☑ Ryugu Arrival
- ☑ Characterization of Ryugu, Mapping, Gravity Measurement.
- ☑ Delivering Two MINERVA-II1 Rovers to Asteroid Surface
- ☑ Delivering MASCOT Lander to Asteroid Surface
- ☐ Spacecraft Touch-Down
- ☐ Crater Forming
- ☐ Delivering MINERVA-II2 Rovers to Asteroid Surface
- ☐ Spacecraft Touch-Down to Crater* (if situation allows)
- ☐ Earth Return

ありがとうございました

ミッション経緯資料は以下からもダウンロードいただけます
http://www.hayabusa2.jaxa.jp/enjoy/material/

Thank you

Additional ENGLISH Materials
http://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/enjoy/material/