

小惑星探査機

はやぶさ

HAYABUSA

A technology Demonstrator for Sample and Return



「小惑星探査機はやぶさ (MUSES-C)」で探査した天体は、地球に接近する小惑星であるイトカワです。私たちは、この計画を通して、小惑星から表面の物質 (サンプル) を地球に持ち帰る技術 (サンプル・リターン) を確立しました。地球上でサンプルの分析が行えるため、回収される量が少量であってもその科学的意義は極めて大きいものとなります。今までのサンプル・リターン計画は、非常に大型のロケットが必要とされることから断念されてきましたが、より到達しやすい小惑星が見出されたことや、探査機の推進機関 (エンジン) の高性能化により、実現可能となりました。「はやぶさ」は、これからの最先端の工学的技術を習得することに焦点を当てたミッションで、貴重な技術をいくつも得ることができました。

探査ミッション概要 Mission Outline

The Primary goal of "HAYABUSA" (MUSES-C) mission is to acquire and verify technology which is necessary to collect samples from a small celestial body and to bring them back to the Earth. The HAYABUSA spacecraft is equipped with the capabilities of solar powered electrical propulsion system, autonomous navigation and guidance to a small target in deep space, rendezvous with the asteroid, and sample recovery.



私たちの太陽系は、太陽および8つの惑星とその衛星、準惑星、そして多くの小惑星や彗星などの小天体で構成されています。小惑星は軌道がわかっているものだけでも48万個以上あり、主に火星と木星の軌道の間には存在しますが、地球より内側や海王星より外側にも発見されています。はやぶさが探査した小惑星イトカワは、地球に近づく軌道を持つ小惑星であり、その大きさはおよそ535m×294m×209mでした。

小惑星とは？ What is an Asteroid?

Our solar system consists of the Sun, eight planets, their satellites, dwarf planets and a lot of small bodies including asteroids and comets. Most asteroids are located between the orbits of Mars and Jupiter. Some asteroids also exist in the near Earth space and far beyond Neptune's orbit. The size of our mission target asteroid Itokawa is about 535m×294m×209m. The asteroid Itokawa is one of those objects that approach the Earth closely.



私たち人類が、これまでに天体の表面からサンプルを採取したことのある地球以外の天体は月だけです。しかし月のように大きな天体は熱で変成してしまったため、太陽系の初期のこの物質について知ることができません。小惑星は惑星が誕生するころの記録を比較的よくとどめている化石のような天体だといわれています。そこで、小惑星からサンプルを持ち帰る技術が確立されれば、「惑星や小惑星を作るもになった材料がどんなものであったか」「惑星が誕生したころの原始太陽系雲内の様子などがどうであったのか」についての手がかりを得ることができます。

この探査の科学的意義 Scientific Objectives

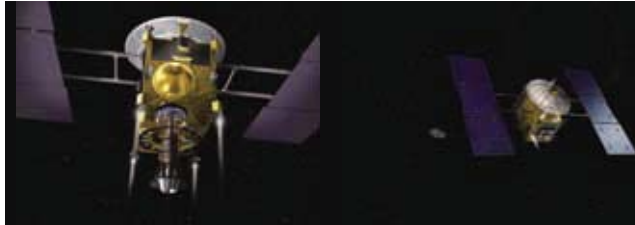
The only celestial body from where samples on the surface had been ever returned to the Earth is the Moon. We cannot learn, however, about the materials in the earlier phase of the solar system from these samples, because larger bodies like the Moon had experienced thermal differentiation. Instead, asteroids are believed to be like fossils, that retain records of planet-forming era. Hence, we can obtain the clues to know the materials that formed planets, and the temperature and pressure of the early solar nebula.

はやぶさの軌跡

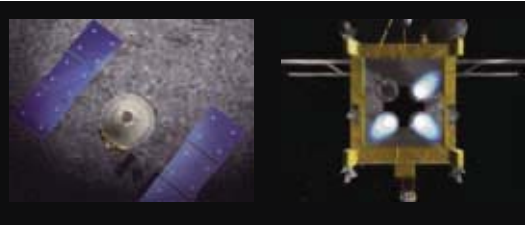
2003年5月9日	打上げ
2004年5月19日	地球スイングバイ
2005年7月29日	イトカワの最初の写真撮影
2005年9月12日	イトカワ到着
2005年11月20日	タッチダウン 1回目
2005年11月26日	タッチダウン 2回目
2010年6月13日	地球帰還
2010年11月16日	微粒子確認

Hayabusa's Event List

May.9, 2003	HAYABUSA was launched
May.19, 2004	Earth Swingby
Jul.29, 2005	The first image of Itokawa taken by HAYABUSA
Sept.12, 2005	HAYABUSA arrived at Itokawa
Nov.20, 2005	1st Touchdown
Nov.26, 2005	2nd Touchdown
Jun.13, 2010	Reentry
Nov.16, 2010	Identification of origin of particles brought back by Hayabusa



● 探査機
Spacecraft



● 軌道
Trajectory

● 電気推進 (イオンエンジン)
Electric Propulsion (Ion Engine)

探査機

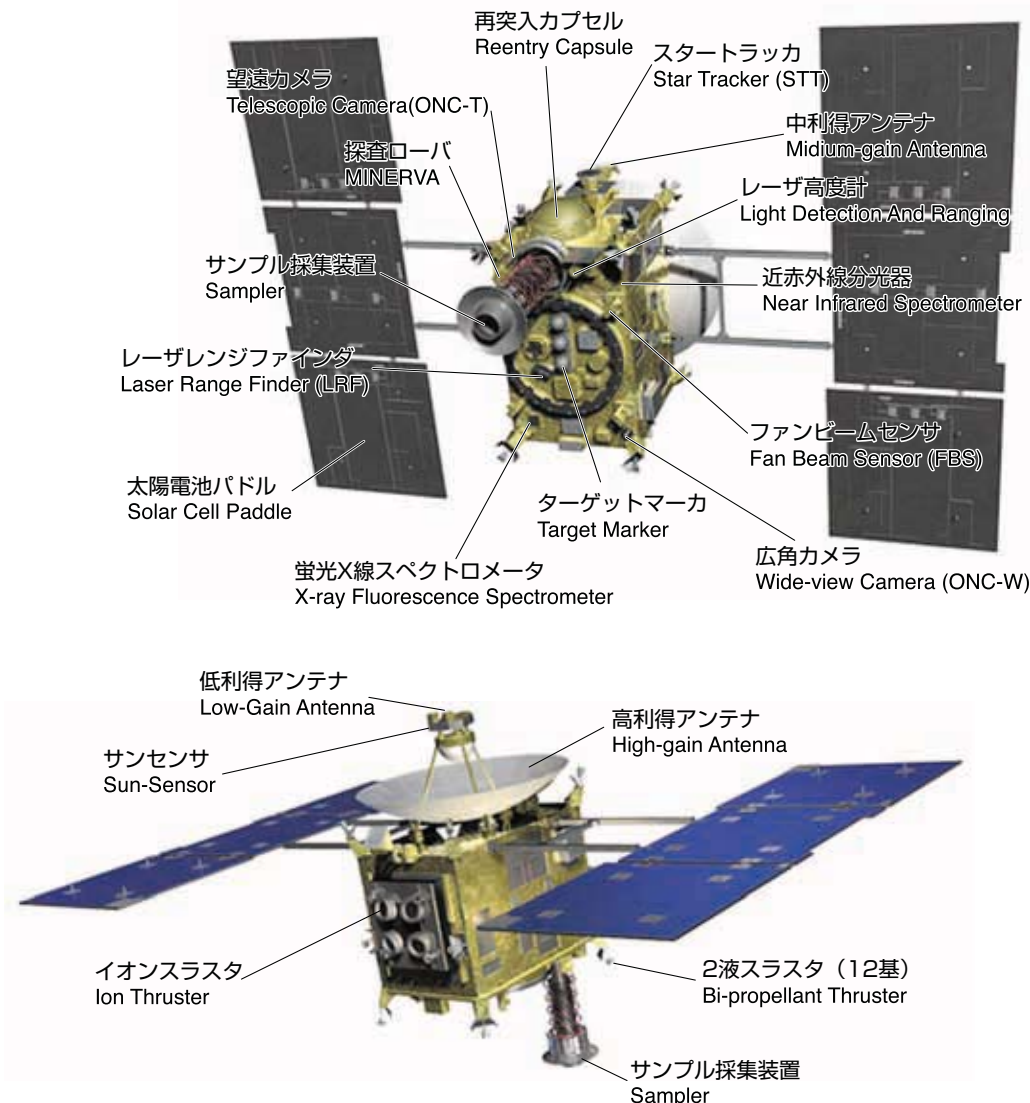
Spacecraft

探査機の重量は約510kgで、その姿勢は基本的には太陽電池パドルを太陽の方向に向けるように制御されます。電波でも往復に何十分もかかる遠いところにある正確な形さえわからない小惑星に接近するために、この探査機は高い自律機能を持ち、カメラの撮像やレーザ高度計により距離や形をとらえ、探査機自身がその場でどういう行動をとるべきかを考えます。また従来の探査機に比べても画期的な軽量化が行われており、各種の搭載機器開発では日本の技術が結集されました。

The spacecraft is about 510 kg in wet mass and is 3-axis stabilized with 1.6[m] x 1.1[m] x 1.0[m] dimensions. In order to explore an asteroid which is far from the Earth and has an unknown shape, the spacecraft is provided with highly autonomous function and controls itself by means of optical sensing as well as data processing. Top expertise of Japanese space technology is fully utilized to develop light-weight instruments for the HAYABUSA spacecraft.



フライトモデル
Flight Model

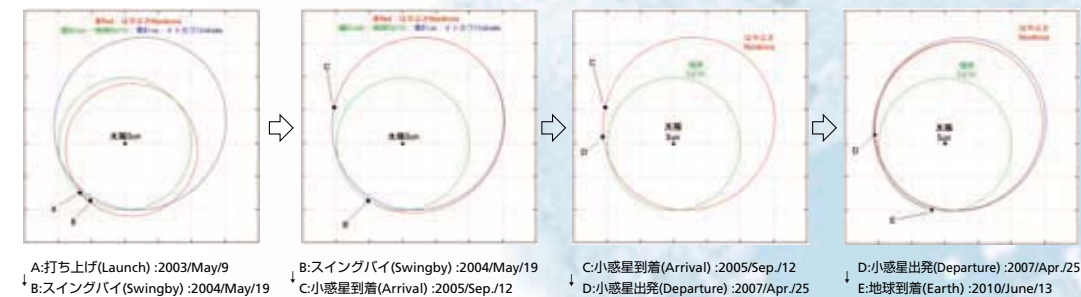


軌道

Trajectory

「はやぶさ」探査機は2003年5月にM-V型ロケット5号機によって小惑星イトカワに向かう軌道に投入され (A)、2004年5月の地球スイングバイを経由して (B)、2005年9月12日に小惑星イトカワに到着しました (C)。到着直前には、小惑星をカメラでとらえながら航行する光学航法も行われました。到着後、3ヶ月間にわたって科学観測やタッチダウンが行われました。最後のタッチダウン後にトラブルが発生したために、小惑星軌道から出発するのが2007年4月25日となり (D)、地球に2010年6月13日に帰還しました (E)。

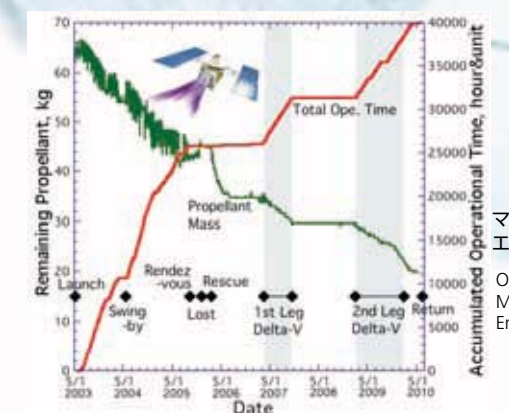
The Hayabusa spacecraft was launched in May 2003 by ISAS's M-V-5 launch vehicle (A) and after executing Earth swingby in May 2004 (B), it arrived at Asteroid Itokawa on September 12, 2005 (C). Before arriving at the asteroid, Hayabusa was guided with optical navigation. Hayabusa carried out the scientific observations and touchdown in about three months after the arrival. Since there occurred some troubles after the final touchdown, Hayabusa started from Itokawa in April 25, 2007 (D), and it came back to the earth in June 2010 (E).



電気推進 (イオンエンジン)

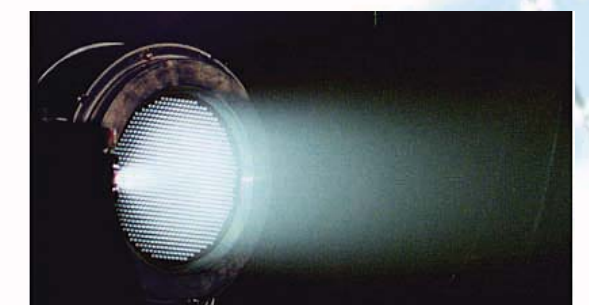
Electric Propulsion (Ion Engine)

地球と小惑星間の往復航行には、主な推進機関として電気推進イオンエンジンを用いました。推進剤キセノンを電離させ、電位差を利用して加速・噴射して推進力を発生します。イオンエンジンは推力は小さいものの、長時間連続作動が可能であり、従来の化学燃料式推進機関に比べて噴射速度が非常に大きく、少量の推進剤で往復航行を達成できます。往復航行のため、スラスタ4台合計で4万時間、秒速2.2 km分の加速を実施しました。

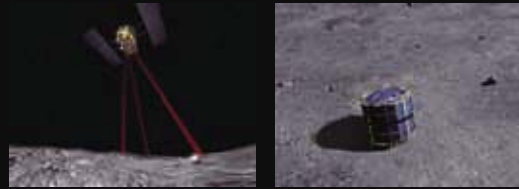


マイクロ波放電式イオンエンジンの宇宙作動履歴
Operational History of Microwave Discharge Ion Engines in Deep Space.

The ion engines are dedicated for the round-trip of the spacecraft between Earth and the asteroid Itokawa. The propellant Xenon is first ionized by microwave discharge, followed by high voltage acceleration in order to generate the thrust, which is very small. But, a high exhaust velocity with long-term operation saves on propellant in comparison with that of conventional chemical thrusters. Four units of ion engines have accelerated the spacecraft 2.2 km/s as a result of 40,000-hour&unit total operation in space.



イオンエンジンの運転状況
Ion Engine under Operation



● 接近・着陸のための航法・誘導・制御

Navigation, Guidance and Control for Rendezvous and Touchdown

● 科学観測

Scientific Observation



● サンプル採集

Sample Collection

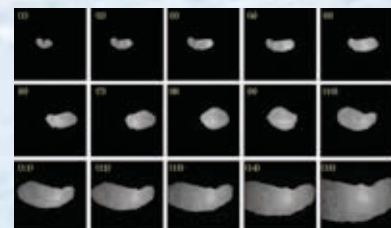
● 再突入カプセル

Reentry Capsule

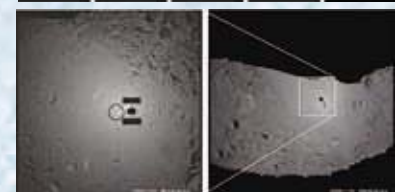
接近・着陸のための航法・誘導・制御

Navigation, Guidance and Control for Rendezvous and Touchdown

大きさも形状も未知の小惑星に接近・軟着陸するためには、高度な航法・誘導・制御が必要になります。航法用カメラ、レーザ高度計、近距離センサ、衝突防止センサ等のセンサ



を組み合わせて使うことにより、探査機は安全に接近・着陸することができます。探査機は人工的な標的であるターゲットマーカを投下し、画像でトラッキングしながら横速度をキャンセルし、サンプリング予定地点にタッチダウンすることに成功しました。



接近降下中の画像シーケンスとターゲットマーカ
Image sequence obtained during the descent phase, and the target marker



ターゲットマーカ
Target Marker



ターゲットマーカには、一般から募った世界149の国と地域から、およそ88万人の方の名前を刻んだアルミフィルムを載せています。

The names of approx. 880,000 people representing 149 nationalities, who wished to join this mission and to send their names to the asteroid, attached on the target marker.

Rendezvous and touchdown with the asteroid whose size and shape are unknown requires intelligent and advanced navigation, guidance and control systems. The combination of Optical Navigation Camera (ONC), Light Detection And Ranging (LIDAR), Laser Range Finders (LRF) and Fan Beam Sensors (FBS) makes it possible for the spacecraft to approach and touchdown on the asteroid surface safely. The spacecraft was successfully navigated and guided to the sampling site by tracking the artificial target marker released from the spacecraft.

小型ローバ・ミネルバ Small Rover MINERVA

ミネルバは、回転するホイールの反動を利用して、はねながら、小惑星表面を移動する小型探査ローバである。ステレオカメラを持っており、あたかもイトカワ表面にいるような臨場感あふれた立体画像を撮影できる。イトカワ表面近くで切り離されたが、表面に達することはできなかった。

MINERVA is a small rover and it can hop on the surface of the asteroid by using a rotating wheel inside. It has a stereo camera and 3D photos will give you the feeling of being on Itokawa. It was separated near the surface of Itokawa, but it could not reach the surface.



ミネルバ MINERVA



ミネルバが撮影したはやぶさの太陽パドル
Image of Hayabusa solar paddle taken by MINERVA

科学観測

Scientific Observation

小惑星近傍では、1) 望遠(多色)カメラを用いた形状・地形観測、2) 高度計を用いた重力計測、3) 赤外線分光器を用いた表面鉱物組成調査、4) 蛍光X線スペクトロメータを用いた表面元素組成調査、などの科学観測を実施し、イトカワの素顔に迫りました。小惑星イトカワについて「はやぶさ」が行った探査によって、これまで見ることができなかった小惑星の姿を明らかにすることができました。

During the rendezvous phase, the following were investigated; 1) global shape and surface feature measurement using multi band camera (AMICA), 2) gravity measurement using altimeter, 3) surface mineral composition measurement using infrared spectrometer, 4) surface elemental composition using fluorescence X-rays spectrometer. Through the exploration of the asteroid Itokawa by Hayabusa spacecraft, the nature of the asteroid that has not been ever seen, was clarified.



望遠カメラ(多色カメラ)
ONC-T (AMICA)



近赤外線分光器
NIRS



レーザ高度計
LIDAR



蛍光X線スペクトロメータ
XRS



AMICAの撮影した小惑星イトカワ(カラー合成)
Itokawa taken by AMICA (Three-color composite image)

サンプル採集

Sample Collection

小惑星に到着して科学観測を行った後、「はやぶさ」はイトカワ上で最も滑らかな地域である「ミュゼスの海(正式名称:muses-C Regio)」から合計二回、表面物質のサンプルを採取することに挑みました。第一回目は降下中に障害物を検出したために途中でシーケンスを中止し、その後緩やかなバウンドを繰り返して表面に約30分間着陸し、離陸しました。このとき小石が敷き詰められた着陸地点で、サンプル採取装置の先端が巻き上げた表面物質が探査機内に取り込まれた可能性があります。第二回目は予定通りのタッチダウンを実現し、表面との接触時間は1秒程度でした。弾丸の発射は指令されましたが、プログラム上の問題で実際には発射されなかったものと推定されています。しかし、第一回目と同様に表面物質が収集容器に捕獲された可能性があります。サンプル採取装置は、タッチダウンの瞬間に小惑星表面へ弾丸を撃ち込み、一枚岩、小石、粉体層などあらゆる表面状態に対して対応できる機構となっています。

One of the biggest challenges during the rendezvous phase with the asteroid is sample collection from the surface. After the completion of remote sensing observation and the selection of the smooth Muses-C regio filled with pebbles as the landing site, the operation team conducted touchdown sequences for surface sampling attempts twice. The impact sampling device was designed to comply with any surface conditions: monolith, gravels and powdery regolith. At the first sampling attempt, the spacecraft terminated the touchdown sequence after detection of an obstacle, bounced several times, landed and stayed on the surface, and ascended safely. There is a possibility that the sampler horn kicked off surface materials during the bouncing and some of them reached to the sample canister inside the spacecraft. At the second attempt, the spacecraft conducted the touchdown sequence exactly as scheduled and the total duration of the touchdown was about 1 second. Shooting a projectile was commanded, however, presumably it was not shot due to the program problem. But, as in the first touchdown, some small amount of surface material may have been caught in the sample catcher aboard.



サンプル採集装置
Sampler



タッチダウンの様子
Illustration of Touchdown



「ミュゼスの海」の画像
Image of MUSES-C Regio

再突入カプセル

Reentry Capsule

「はやぶさ」ミッションの最終フェーズで、小惑星のサンプルが採取されているかもしれない直径40cmの小型の回収カプセルが惑星間軌道から秒速約12kmの速度で直接地球大気圏に再突入しました。再突入中にカプセルの受ける最大空力加熱率はスペースシャトルの場合より何十倍も大きく、月から戻ってきたアポロの場合よりも数倍大きい過酷な環境です。耐熱材料の開発は、世界的にも最先端の技術です。カプセルは大気による十分な減速後、さらにパラシュートを開き、地上に軟着陸しました。その際、カプセルからのビーコン信号によって地上で位置を割り出し回収に成功しました。カプセルはキュレーション設備内で開封され、サンブラキャッチャ内からイトカワ起源と思われる微粒子のピックアップを行っています。

In the final phase of the HAYABUSA mission, a small capsule (40 cm in diameter) conducted the earth reentry at the velocity about 12 km/s directly from the interplanetary trajectory. The maximum heat transfer rate on the capsule during the reentry is 30 times higher than that on the Space Shuttle orbiter and even several times higher than on the Apollo recovery module. Development of the heat shield material was one of the technological challenges. After decelerated by the atmospheric drag, the capsule will deploy a parachute for soft-landing. The capsule with the asteroid samples were retrieved on the desert by tracking the beacon signals of the capsule. The capsule was opened at the curation facility in Sagamihara campus. The particles of the Itokawa are picked up in the clean chamber at this facility.



回収カプセルとその耐熱材料の地上加熱試験

The Reentry Capsule and the Arc Heating Test of the Thermal Protection Material



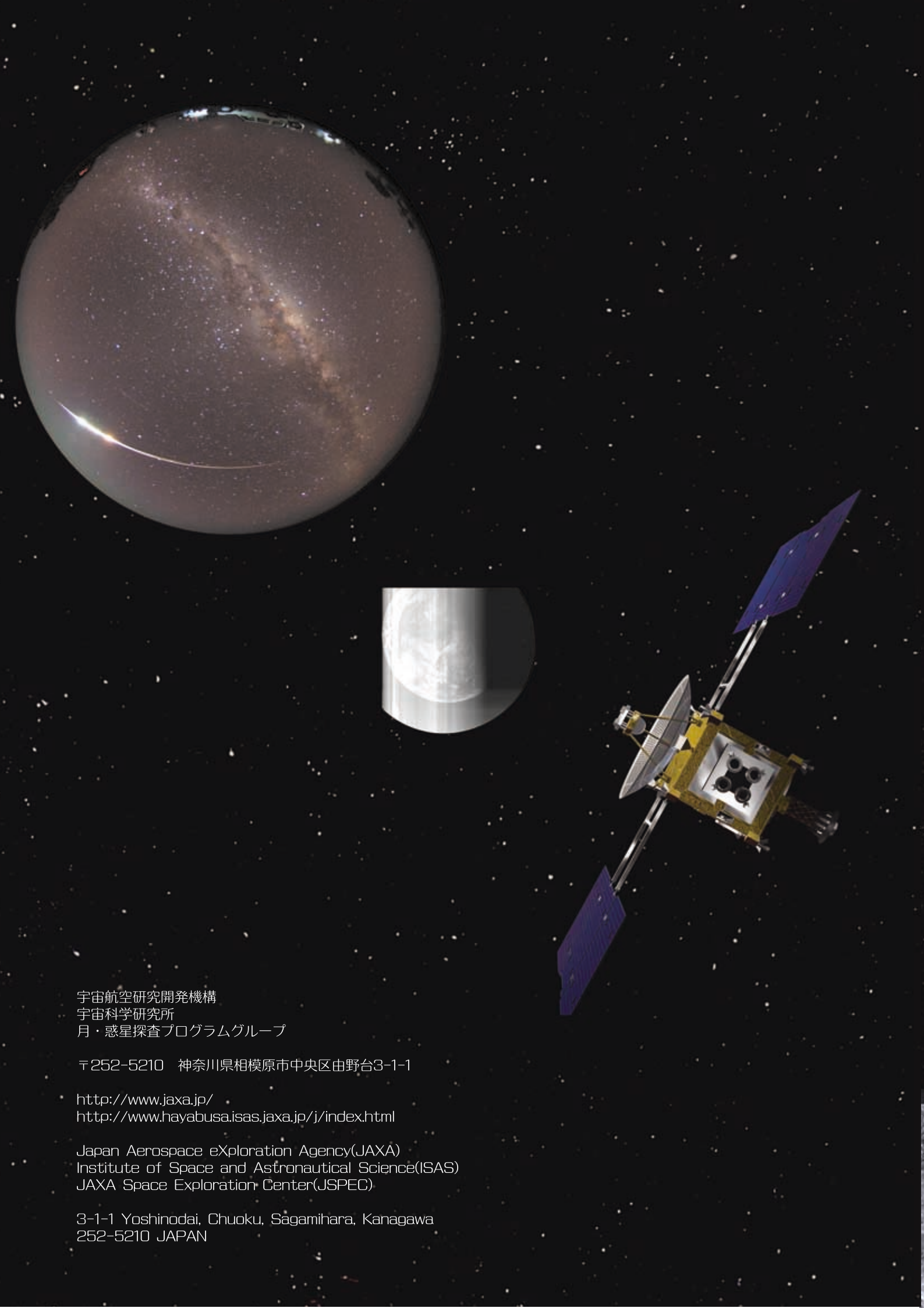
着地した再突入カプセル
The reentry capsule landed on the ground



カプセルの開封とサンプルの取り出しを行っているクリーンチャンバー
The clean chamber which is performing opening of a capsule, and extraction of a sample



はやぶさが持ち帰ったイトカワ起源の粒子(電子顕微鏡写真)
The particle of the Itokawa which Hayabusa brought back to the Earth



宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所
月・惑星探査プログラムグループ

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

<http://www.jaxa.jp/>
<http://www.hayabusa.isas.jaxa.jp/j/index.html>

Japan Aerospace eXploration Agency(JAXA)
Institute of Space and Astronautical Science(ISAS)
JAXA Space Exploration Center(JSPEC)

3-1-1 Yoshinodai, Chuoku, Sagamihara, Kanagawa
252-5210 JAPAN