

はやぶさ2 プロジェクトについて (A改訂)

宇宙航空研究開発機構
月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC)
はやぶさ2プリプロジェクトチーム
吉川 真

目次

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ
1. プロジェクトの意義・目的
2. プロジェクトの目標
3. 「はやぶさ2」の開発方針
4. システム選定及び基本設計要求
5. 開発計画
6. リスク管理
7. まとめ

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ(1/5) 小惑星探査計画の立上げから「はやぶさ」まで

- 1985(S60)年8月、日本初の「小惑星サンプルリターン小研究会」を旧宇宙科学研究所(ISAS)が開催。
- 1996(H8)年4月、小惑星探査技術実証プロジェクト「MUSES-C」が開始。
- 2003(H15)年5月、MUSES-C(はやぶさ)探査機打上げ、運用開始。
- 2004(H16)年4月、JSPEC(当時・宇宙科学研究本部)の元に、「次期小天体探査WG」が正式発足。S型、C型、D/P型とより始原的な天体へ向かうプログラムの探査の科学・技術の検討を継続。(小惑星の型についてはp54を参照)
- 2005(H17)年9月12日にははやぶさが小惑星イトカワに到着。11月末までにリモートセンシングによる探査とサンプル採取を実施。サンプル採取は当初意図した形では実施できなかった。
 - 当初: 自律的に弾丸を発射し、試料採取。
 - 実際: 自律航法の問題により、弾丸が発射されなかった。
(着陸時に舞い上がった粉塵が採取された可能性あり)

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ(2/5) 小惑星探査計画の立上げから「はやぶさ」まで

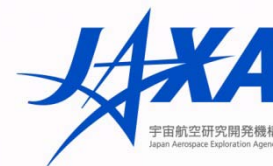
- 2006(H18)年初、確実に小惑星物質を採取するために「はやぶさ」同型機による新たなサンプルリターンミッション「はやぶさ2」を早急に立上げる検討が開始。探査天体として、C型小惑星である1999 JU3を選定。(詳細はp.55参照)
- 2006(H18)年4月、JAXA長期ビジョンに基づき「月・惑星探査推進チーム」(現JSPEC)を設置。同チーム内で「始原天体探査プログラム」を検討。
- 2006(H18)年10-11月、ミッション定義、システム要求ならびにシステム定義に関わる一連の技術審査を実施。
- 2007(H19)年6月、プロジェクト準備審査が行われ、2007(H19)年8月29日、プリプロジェクトに移行。
- 2008(H20)年11月、H2A相乗り打ち上げや、海外の廉価なロケットの利用など、経費節減について検討をしつつ、従来のミッションからスコープを拡大する検討を開始。
- 2009(H21)年6-7月、スコープ変更後のはやぶさ2計画について、外部評価を経て△MDR審査(ミッション定義審査)でミッション要求の妥当性が審査され、「小惑星探査機 はやぶさ2」プロジェクト準備審査(デルタ審査)で一部のスコープ拡大に伴う変更が決定。

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ(3/5) 小惑星探査計画の立上げから「はやぶさ」まで

- 2009年12月、システム要求審査(SRR)を実施し、システム定義審査フェーズへの移行が了承された。
- 2010年6月、「はやぶさ」地球に帰還。帰還カプセル内のサンプルコンテナを無事に回収し、初期分析作業を開始。

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ(4/5)

「はやぶさ2」の位置づけ



宇宙基本計画
(平成21年6月2日閣議決定)

「(2) 研究開発プログラムの推進 F 宇宙科学プログラム

② 5年間の開発利用計画

・太陽系探査としては、太陽系の理解、地球(大気、磁気圏含む)の理解等に繋がる科学的成果の創出を目指し、太陽、月、地球型惑星(水星、金星、火星)、さらには木星やその衛星、小惑星などを対象として、…「はやぶさ」による小惑星からのサンプル回収への取組や…将来の水星探査計画「BepiColombo」、[「はやぶさ」後継機等の研究開発を行う。](#)

「9つの主なニーズと衛星開発利用等の現状・10年程度の目標:

【世界をリードする科学的成果の創出等(知的資産の蓄積、人類の活動領域の拡大)】
今後10年程度の目標のためにセンサや衛星等が達成すべき主要な目標:

…○太陽系探査(水星、金星、小惑星探査)…

10年程度の想定衛星:

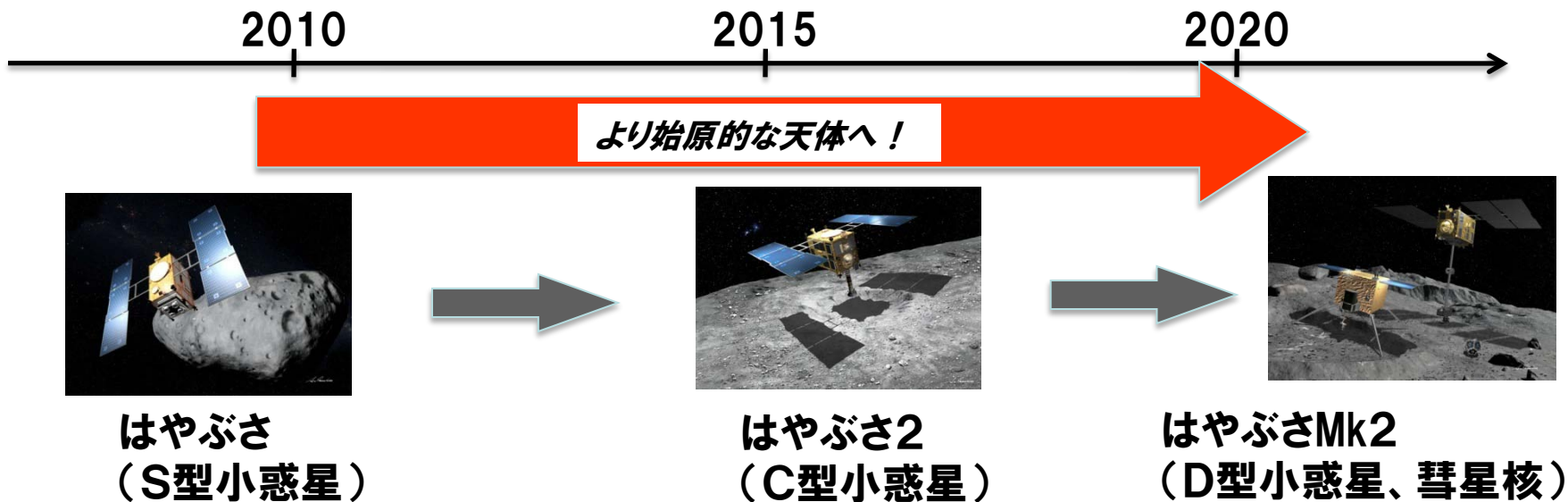
ASTRO-G(電波)及びその他宇宙天文学ミッション(ASTRO-H(X線)、SPICA(赤外)など)、Planet-C(金星)、BepiColombo(水星)及びその他太陽系探査ミッション(SCOPE(磁気圏)、小惑星探査衛星(はやぶさ後継機)など)、月面着陸・探査ミッション、Ikaros他小型科学衛星(3機/5年) 」

0. はやぶさ2計画の経緯と位置づけ(5/5)

「はやぶさ2」の位置づけ

- 「太陽系探査科学の進むべき方向」(平成19年3月)より
月惑星探査推進チーム・太陽系探査ロードマップ検討小委員会報告

<始原天体探査プログラム>



プログラムの探査

- ・太陽系の起源・進化を知るためには、代表的なタイプであるS型、C型、D型の小惑星を調査する必要がある。
- ・S型、C型、D型の順により始原的になり、太陽系の初期に迫ることになる。
- ・一般的にS型、C型、D型の順に太陽から(あるいは地球軌道から)遠ざかる傾向にあるので、サンプルリターンを行うには、より高度の技術が必要になる。

1. プロジェクトの意義・目的

1.1 意義

1. 科学的意義

「我々はどこから来たか」ー太陽系と生命の原材料とその進化に迫る

地球、海、生命の原材料物質は、太陽系初期には同じ母天体の中で、互いに密接な関係を持っていた。この相互作用を現在でも保っている始原天体からのリターンサンプルを分析することで、太陽系と生命の原材料とその進化に迫る。(次ページ 注記参照)

A

2. 技術的意義

「世界をリードする」ー日本独自の深宇宙探査技術の確立

「はやぶさ」は世界初の小惑星サンプルリターンとして、数々の新しい技術に挑戦したミッションであった。その経験を継承して、より確実に深宇宙探査を行える技術を確立する。

3. 社会的意義

- 国際協力：科学観測データおよびリターンサンプルの詳細分析を国際的に実施することで、国際社会に貢献し、責務を果たす。
- 人材育成：世界をリードをする科学・技術を我が国で実践することで、科学技術立国を担う次世代の人材を育成する。
- 社会への還元：「はやぶさ」で得られた社会からの強い関心に引き続き応えとともに、実践的教育や文化的活動の機会を供給する。

1. プロジェクトの意義・目的

1.1 意義

注: 生命の起源については諸説あるが、地球形成時および形成後も、地球外物質は絶え間なく地球上に落下している。その始原物質中の有機物は、地球上の有機物(生命)の原材料となりうるため、生命につながる第一歩としての重要な意味をもっている。

また、始原天体中の有機物および有機物・氷の量比は地球に供給される揮発性成分(C、H、O、N)の組成を決めるため、地球上で生命の原材料から生命が誕生した環境(大気組成, 酸化還元条件)に大きく影響する。

すなわち、始原天体中の有機物分析は、宇宙空間での生命材料物質の探究、および初期地球での生命材料物質の進化の解明につながるものである。地球上で採取された隕石から、揮発性成分である氷、有機物の存在度を定量的に決定することは地上での汚染の影響で難しく、汚染のないリターンサンプルの分析が必須である。

A

1. プロジェクトの意義・目的

1.2 目的

「太陽系と生命の原材料とその進化に迫る」ために、

- C型小惑星の物質科学的特性を調べる。特に鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする。
- 小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の調査により、小惑星の形成過程を調べる。

「日本独自の深宇宙探査技術の確立」のために、

- 「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。
- 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。

1. プロジェクトの意義・目的

1.3 期待される成果(1/3)

目的: C型小惑星の物質科学的特性を調べる. 特に
 鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする

● 鉱物・水・有機物の相互作用

表層および地下の物質を採取し、小惑星起源の
 鉱物・水・有機物(生命前駆体)がミクロスケールでどのように相互作用し、共存しているかを探り、地球、海、生命との関連が解明される。

● 太陽系・小惑星帯の物質分布

C型小惑星の構成物質を解明し、はやぶさの成果と合わせて、原始太陽系における日心距離と
 鉱物・水・有機物といった物質の分布が明らかになる。

→ 成果を生み出す研究: 回収試料の熱変成、元素(同定・分布)、
 鉱物(同定・分布)、「水」の存否、有機物、同位体(C,H,O,N)、C型宇宙風化等の分析など。

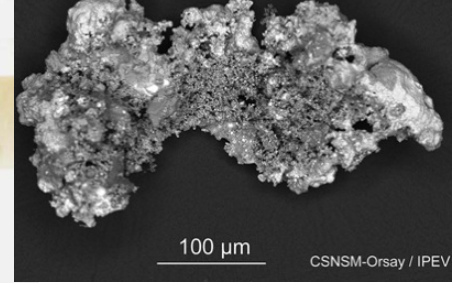
探査技術:

確実な探査技術の確立(天体往復、試料採取、カプセル帰還の技術)が重要となる。

炭素質コンドライト隕石



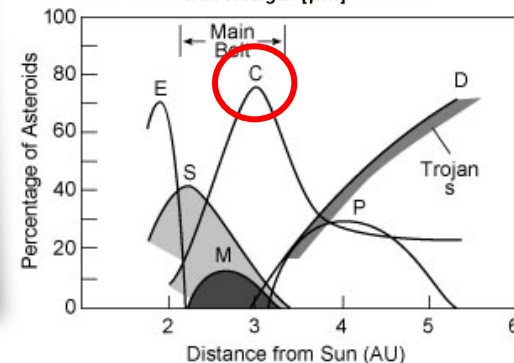
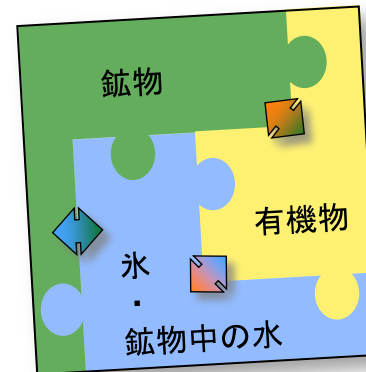
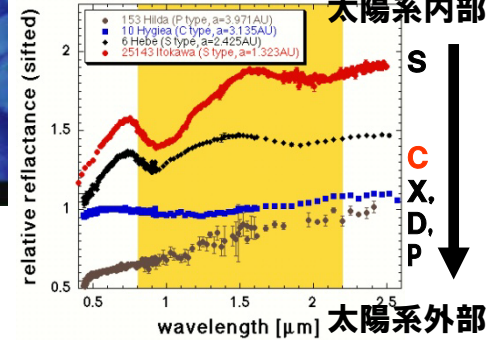
Micrometeorite CONCORDIA
 有機物含有南極宇宙塵



隕石中の「水」の発見



日心距離とC型小惑星分布
 太陽系内部



1. プロジェクトの意義・目的

1.3 期待される成果 (2/3)

目的: 小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の調査により、小惑星の形成過程を調べる。

● 微小小惑星の内部構造、形成過程

C型微小小惑星のマクروسケールでの表層地形、物性、内部構造を探索し、小惑星の形成過程について重要な手がかりが得られる。

● 微小小惑星の地下物質

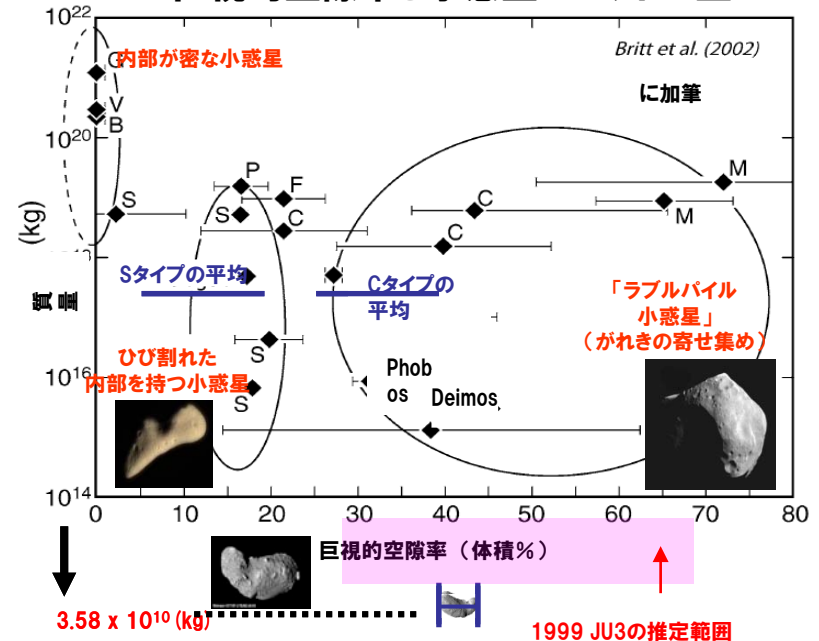
新鮮な地下物質の鉱物-水-有機物相互作用を調べることで、C型小惑星材料物質の進化過程について重要な手がかりが得られる。

→ 成果を生み出す研究: 重力・質量・密度・空隙率の導出、全球地形・鉱物分布、表面温度・熱慣性の測定、含水鉱物・有機物採取候補地点の選定、人工クレーター形状・地形、特徴地形の変化、再集積物の確認、新鮮な地下物質(水・含水鉱物・有機物分子種)など。

探査技術:

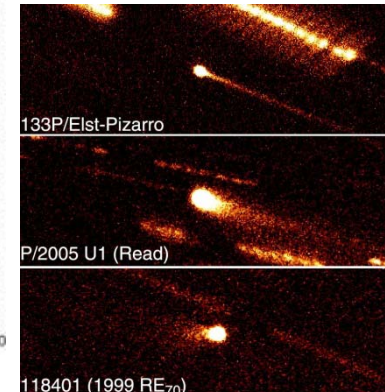
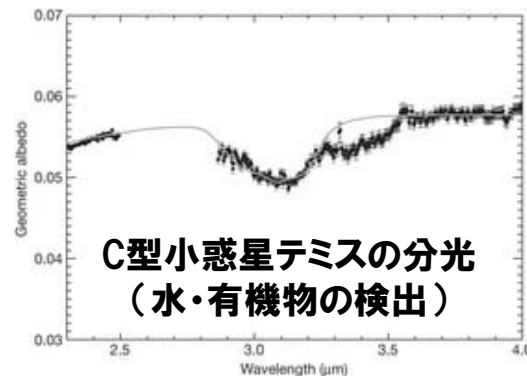
衝突装置を用いた新しい探査手法が、地下物質に対する成果を拡充する。

巨視的空隙率と小惑星スペクトル型



イトカワ (S)

メインベルト彗星の発見



1. プロジェクトの意義・目的

1.3 期待される成果 (3/3)

目的:

- 「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。
- 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。

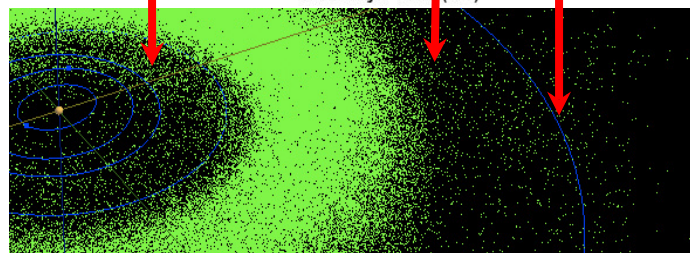
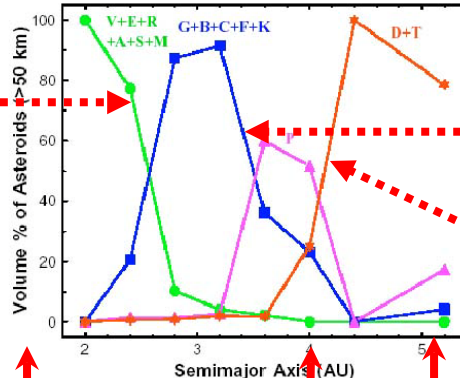
● 「はやぶさ」技術の成熟

はやぶさで実証できた技術は継承し、修正点はロバスト性、確実性、運用性を向上させて、太陽系小天体の往復探査を行う技術が成熟する。

● 将来の探査技術の基盤

これにより、地球近傍小天体や火星圏など内惑星領域の往復探査の継続的な実施と、木星圏など外惑星領域の日本独自の探査に挑戦できる、技術的・運用上の基盤が得られる。また、深宇宙港構想についてのアプローチともなる。

始原天体探査プログラム構想



太陽系内側

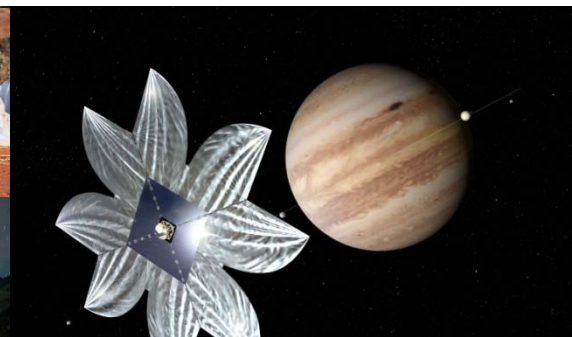
地球軌道

木星軌道

太陽系外側



内惑星領域往還技術の確立



外惑星領域探査への応用

1. プロジェクトの意義・目的

1.4 「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較(1/2)

- 「はやぶさ」の技術確立に加え、新たな科学を目指す。

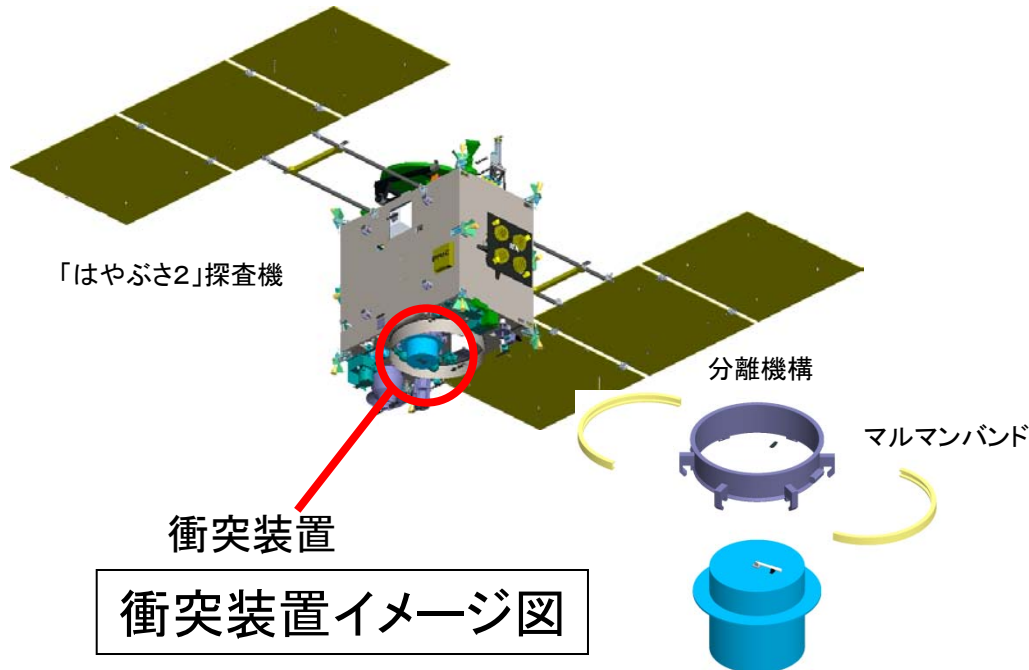
	はやぶさ	はやぶさ2
目的	 <p>深宇宙往復探査に必要な五つの工学実証</p>	 <p>C型小惑星サンプルリターンおよび確実な深宇宙往復探査技術の確立</p>
探査天体	S型小惑星	C型小惑星 (より始原的な小惑星。有機物や含水鉱物に富んでいる。)
ミッション機器	<ul style="list-style-type: none">• 近赤外分光計• 蛍光X線分光計• 多バンド可視カメラ• レーザー測距	<ul style="list-style-type: none">• 近赤外分光計の観測帯域を長波長側に変更し、水の検出を行う。• 蛍光X線分光計から中間赤外カメラに変更し、熱慣性計測を行う。• 衝突装置を追加し、地下物質を露出させる。
打ち上げ年	2003年	2014年

1. プロジェクトの意義・目的

1.4 「はやぶさ」と「はやぶさ2」の比較(2/2)

衝突装置(インパクト)概要

- インパクトを分離し、探査機が退避後に衝突体を発射、衝突する。
- 衝突体が衝突する前後の表面の変化から小惑星の内部構造を調査する。また、露出した地下物質のリモート観測を行う。
- 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も行い、表層下の“新鮮な”物質を採取する。



インパクトを分離し、探査機が退避後に発射、衝突する。

内部構造、地下物質の観測を行い、露出した地下物質を採取する。



2. プロジェクトの目標(1/3)

2.1 目標

成功基準について以下に説明する。

目的	目標(ミニマム)	目標(フル)	目標(エクストラ)
<p>理学目的1 C型小惑星の物質科学的特性を調べる。特に鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする。</p>	<p>小惑星近傍からの観測により、C型小惑星の表面物質に関する、新たな知見を得る。(※) 達成判断時期: 探査機の対象天体到達1年後</p> <p>(※)小惑星表面の分光データを10セット取得する。</p>	<p>採取試料の初期分析において、鉱物・水・有機物相互作用に関する新たな知見を得る。(※) 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p> <p>(※)サンプルを100mg以上採取する。</p>	<p>天体スケールおよびマイクロスケールの情報を統合し、地球・海・生命の材料物質に関する新たな科学的成果を上げる。 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p>
<p>理学目的2 小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の直接探査により、小惑星の形成過程を調べる。</p>	<p>小惑星近傍からの観測により、小惑星の内部構造に関する知見を得る。(※) 達成判断時期: 探査機の対象天体到達1年後</p> <p>(※)小惑星のバルク密度を±7%の精度で決定する。</p>	<p>衝突体の衝突により起こる現象の観測から、小惑星の内部構造・地下物質に関する新たな知見を得る。(※) 達成判断時期: 探査機の対象天体離脱時まで</p> <p>(※)生成されたクレータを中心として100m四方の画像データを空間分解能20cmで取得する。</p>	<p>衝突破壊・再集積過程に関する新たな知見をもとに小惑星形成過程について科学的成果を挙げる。 探査ロボットにより、小惑星の表層環境に関する新たな科学的成果を挙げる。 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p>

2. プロジェクトの目標(2/3)

2.1 目標

成功基準について以下に説明する。

目的	目標(ミニマム)	目標(フル)	目標(エクストラ)
工学目的1 「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。	イオンエンジンを用いた深宇宙推進にて、対象天体にランデブーする。 達成判断時期: 探査機の対象天体到達時	・探査ロボットを小惑星表面に降ろす。 ・小惑星表面サンプルを採取する。(※) ・再突入カプセルを地球上で回収する。 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還時 (※)サンプルを100mg以上採取する。	N/A
工学目的2 衝突体を天体に衝突させる実証を行う。	衝突体を対象天体に衝突させるシステムを構築し、小惑星に衝突させる。 達成判断時期: 生成クレーター確認時	特定した領域(※)に衝突体を衝突させる。 達成判断時期: 生成クレーター確認時 (※)衝突目標点から半径100mの範囲	衝突により、表面に露出した小惑星の地下物質のサンプルを採取する。 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還時

2. プロジェクトの目標 (3/3)

2.2 成功基準



JAXAのミッション定義審査にて確認した成功基準を参考までに以下に示す。

目的	目標(ミニマム)	目標(フル)	目標(エクストラ)
<p>理学目的1</p> <p>C型小惑星の物質科学的特性を調べる。特に鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにする。</p>	<p>小惑星近傍からの観測により、C型小惑星の表面物質に関する、新たな知見を得る。</p> <p>達成判断時期: 探査機の対象天体到達1年後</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>	<p>採取試料の初期分析において、鉱物・水・有機物相互作用に関する新たな知見を得る。</p> <p>達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>	<p>天体スケールおよびミクロスケールの情報を統合し、地球・海・生命の材料物質に関する新たな科学的成果を上げる。</p> <p>達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>
<p>理学目的2</p> <p>小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の直接探査により、小惑星の形成過程を調べる。</p>	<p>小惑星近傍からの観測により、小惑星の内部構造に関する知見を得る。</p> <p>達成判断時期: 探査機の対象天体到達1年後</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>	<p>衝突体の衝突により起こる現象の観測から、小惑星の内部構造・地下物質に関する新たな知見を得る。</p> <p>達成判断時期: 探査機の対象天体離脱時まで</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>	<ul style="list-style-type: none"> 衝突破壊・再集積過程に関する新たな知見をもとに小惑星形成過程について科学的成果を挙げる。 探査ロボットにより、小惑星の表層環境に関する新たな科学的成果を挙げる。 <p>達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後</p> <p>実施主体: JAXA、はやぶさ2科学チーム</p>
<p>工学目的1</p> <p>「はやぶさ」で試みた新しい技術について、ロバスト性、確実性、運用性を向上させ、技術として成熟させる。</p>	<p>イオンエンジンを用いた深宇宙推進にて、対象天体にランデブーする。</p> <p>達成判断時期: 探査機の対象天体到達時</p> <p>実施主体: JAXA</p>	<ul style="list-style-type: none"> 探査ロボットを小惑星表面に降ろす。 小惑星表面サンプルを採取する。 再突入力カプセルを地球上で回収する。 <p>達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還時</p> <p>実施主体: JAXA</p>	N/A
<p>工学目的2</p> <p>衝突体を天体に衝突させる実証を行う。</p>	<p>衝突体を対象天体に衝突させるシステムを構築し、小惑星に衝突させる。</p> <p>達成判断時期: 生成クレーター確認時</p> <p>実施主体: JAXA</p>	<p>特定した領域に衝突体を衝突させる。</p> <p>達成判断時期: 生成クレーター確認時</p> <p>実施主体: JAXA</p>	<p>衝突により、表面に露出した小惑星の地下物質のサンプルを採取する。</p> <p>達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還時</p> <p>実施主体: JAXA</p>

3.「はやぶさ2」の開発方針