

はやぶさ2サイエンス概要

安部正真・吉川真
はやぶさ2プリプロジェクトチーム

はやぶさ2の科学的意義

「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。

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。

はやぶさ2のミッション目標



ミッション目標

工学目標

- ・「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。

理学目標

**我々はどこから来たか：
太陽系と生命の起源・進化の探求**

- 「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。

期待される成果(1)

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。

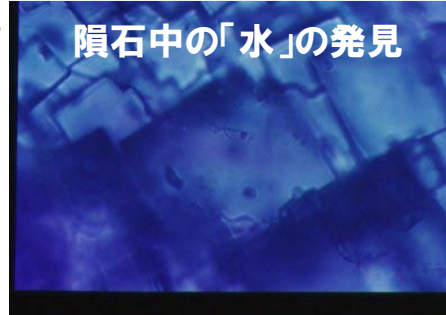
探査技術:

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。

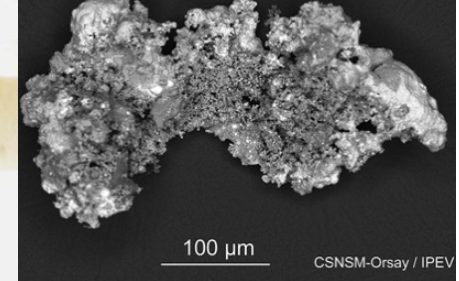
炭素質コンドライト隕石



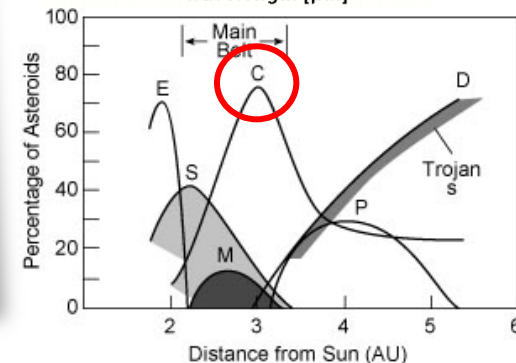
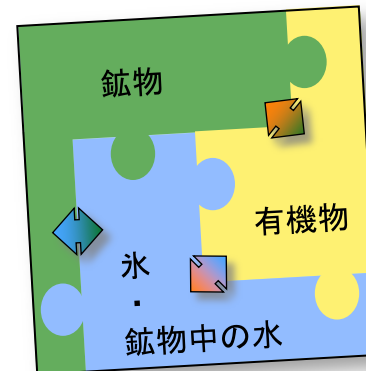
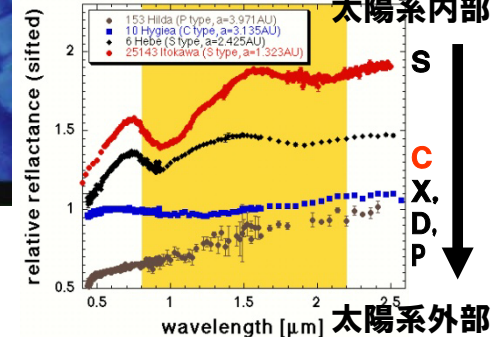
隕石中の「水」の発見



Micrometeorite CONCORDIA
有機物含有南極宇宙塵



日心距離とC型小惑星分布
太陽系内部



期待される成果(2)

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

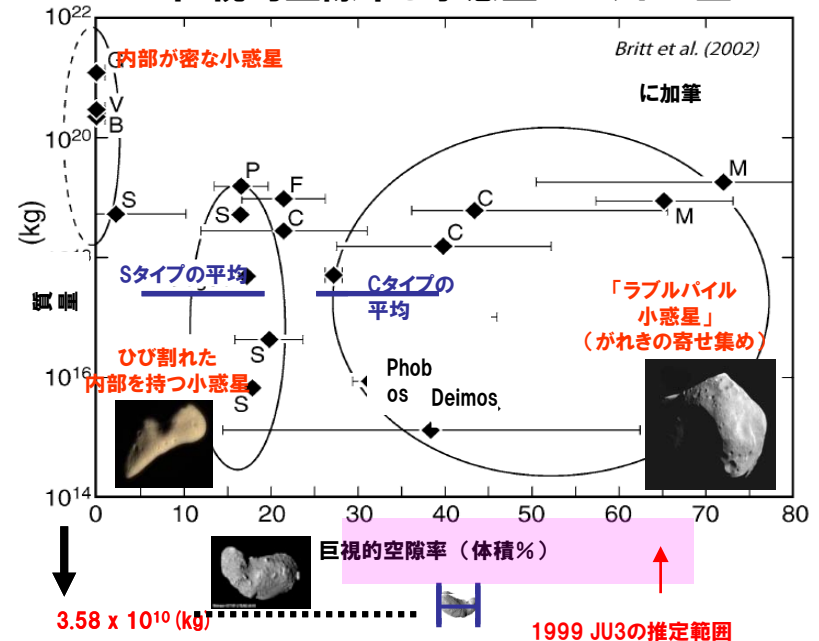
新鮮な地下物質の鉱物-水-有機物相互作用を調べることで、C型小惑星材料物質の進化過程について重要な手がかりが得られる。

→ 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:

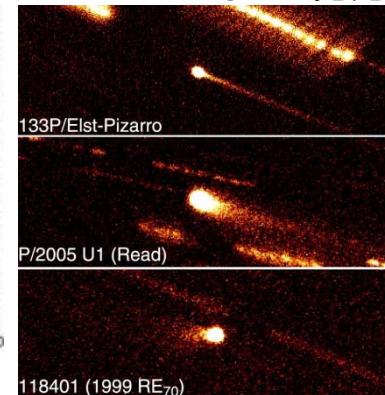
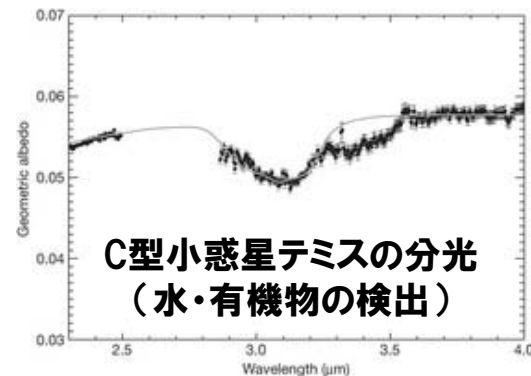
衝突装置を用いた新しい探査手法が、地下物質に対する成果を拡充する。

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



理学目標と成功基準

目的	目標(ミニマム)	目標(フル)	目標(エクストラ)
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。	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 (※)小惑星表面の分光データを10セット取得する。	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 (※)サンプルを100mg以上採取する。	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。 達成判断時期: 試料回収カプセルの地球帰還1年後
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。	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 (※)小惑星のバルク密度を±7%の精度で決定する。	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 (※)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。	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

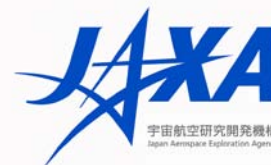
ミッション機器の観測項目

観測機器	観測項目
レーザー測距(*)	小惑星の表面形状、荒さを計測する。 自由落下軌道の測定を行い、重力(小惑星質量)を導出する。
多バンド可視カメラ(*)	地形マッピング、鉱物分布を計測する。
近赤外分光計	水氷、含水鉱物の探索および分布の観測を行う。
中間赤外カメラ	表面温度と熱慣性を調べ、表面状態を明らかにする。
小型ローバ	微小重力天体上の移動技術実証。 表面温度を計測する。表面の撮影を行う。
サンプリング機構	着陸地点の小惑星表面試料を採取する。
地球帰還カプセル	採取した小惑星物質を地球に帰還させる。
衝突装置(**)	人工クレータをつくり、地下物質を露出させる。

* バス機器であるがサイエンス観測にも使用する。

** 科学観測、サンプリングを拡充させるための手段として用いる。

理学目標2のサイエンス要求と観測要求まとめ

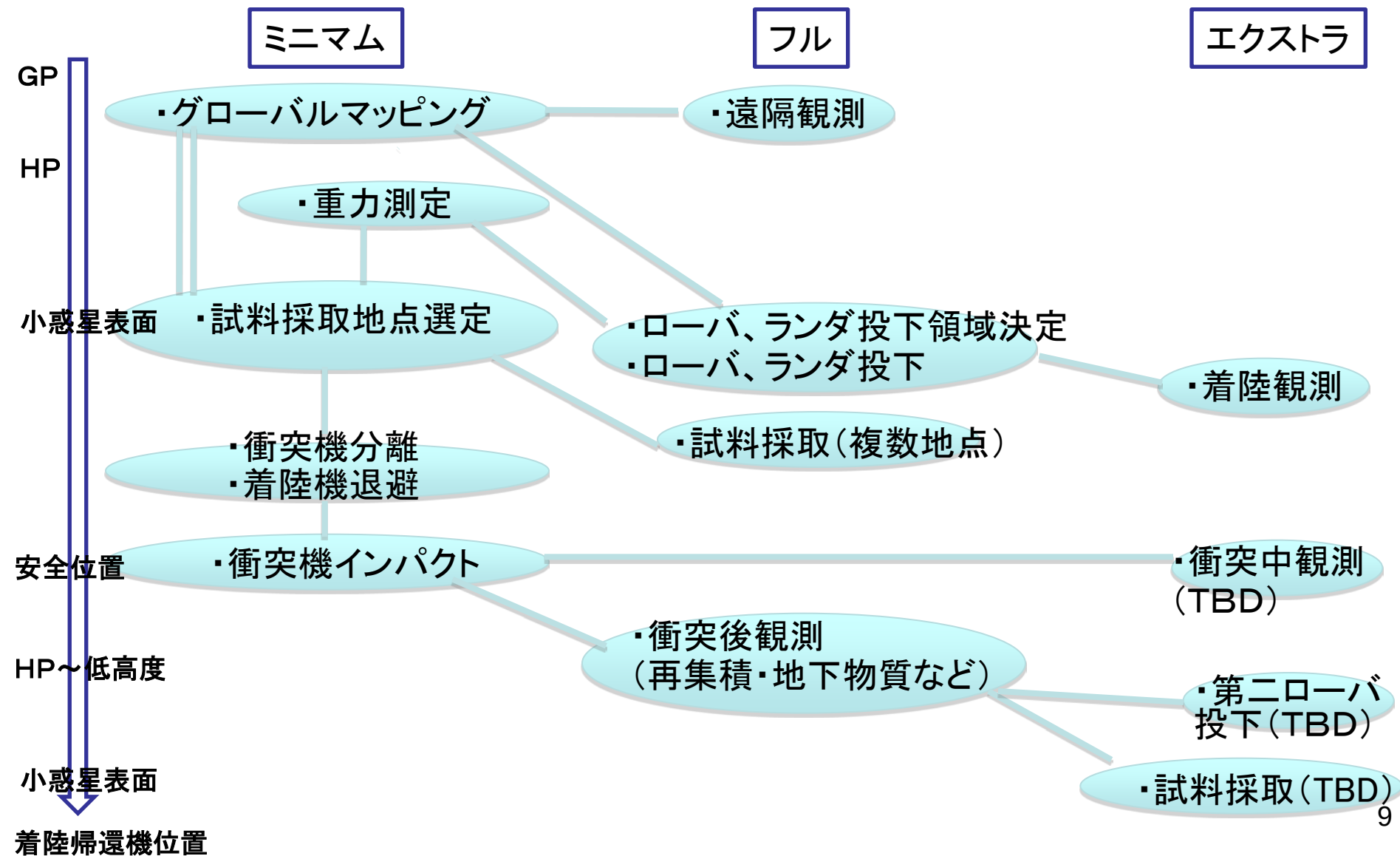


理学目標2	テーマ	何を知りたいのか サイエンス要求	何を見るのか 観測データ	どうやって調べるのか		
				観測装置	観測要求	運用要求
小惑星の再集積過程・内部構造・地下物質の直接探査により、小惑星の形成過程を調べる	内部構造	空隙率(小惑星内部がひび割れた岩盤程度なのか、がれきの寄せ集めの(ラブルパイル)なのか)	小惑星の体積、質量をもとに密度を計算し、空隙率を推定する。	多色カメラ(ONC-T)	10m(2%)の精度で形状を推定し、5%の精度で体積を推定する	1mの空間分解能での全球マッピング
				高度計(LIDAR)	3%の精度で質量を推定する	1000秒間以上の自由落下運動など、重力計測運用の実施
		表面を覆っている岩塊やレゴリスの厚さ	インパクターで形成されたクレータの底を観察し、内部の岩盤層などが露呈するかどうかを見る。	多色カメラ(ONC-T)	クレータの底の状態を50pixel程度の解像度で観測	タッチダウン降下中(高度100m)の観測
				中間赤外カメラ(LIR)	クレータの底の状態(温度・熱慣性)10pixel程度の解像度で観測	タッチダウン降下中(高度100m)の観測
	集積過程	衝突破壊のスケーリング測を明らかにする	インパクターで形成されるクレータのサイズを測定する インパクターで形成されるイジェクタの飛散状況を調べる	多色カメラ(ONC-T)	クレータ形成前後の地形比較を実施。クレータを中心に100m以上の領域を高解像度(10cmのスケール)で観測	高度1kmでのマッピング観測
				多色カメラ(ONC-T)	クレータ形成前後の地形比較を実施。クレータを中心に100m以上の領域を高解像度(10cmのスケール)で観測	高度1kmでのマッピング観測
		表層地下に何があるかを調べる	サンプルを地球に持ち帰り分析する 鉱物組成を調べる	サンプラー	インパクターで露出させた表層地下物質をサンプリングする	イジェクタブランケットを含む領域へのタッチダウン 高度1kmでのマッピング観測 タッチダウン降下中(高度500m)の観測
				近赤外線分光計(NIRS3)	イジェクタブランケットを含む領域を数ピクセルの分解能で分光する	タッチダウン降下中(高度100m)の観測
	表層地下物質	宇宙風化を受けていない物質を見つける	宇宙風化度の違いを調べる	多色カメラ(ONC-T)	クレータの底の状態を50pixel程度の解像度で観測	タッチダウン降下中(高度100m)の観測
				近赤外線分光計(NIRS3)	イジェクタブランケットを含む領域を数ピクセルの分解能で分光する	高度1kmでのマッピング観測 タッチダウン降下中(高度500m)の観測
		低温を維持していた地下物質を調べる	水や有機物の存在状態を調べる 水の存在状態を調べる	サンプラー	インパクターで露出させた表層地下物質をサンプリングする	イジェクタブランケットを含む領域へのタッチダウン タッチダウン降下中(高度100m)の観測
				多色カメラ(ONC-T)	クレータの底の状態を50pixel程度の解像度で観測	高度1kmでのマッピング観測 タッチダウン降下中(高度500m)の観測
				近赤外線分光計(NIRS3)	イジェクタブランケットを含む領域を数ピクセルの分解能で分光する	

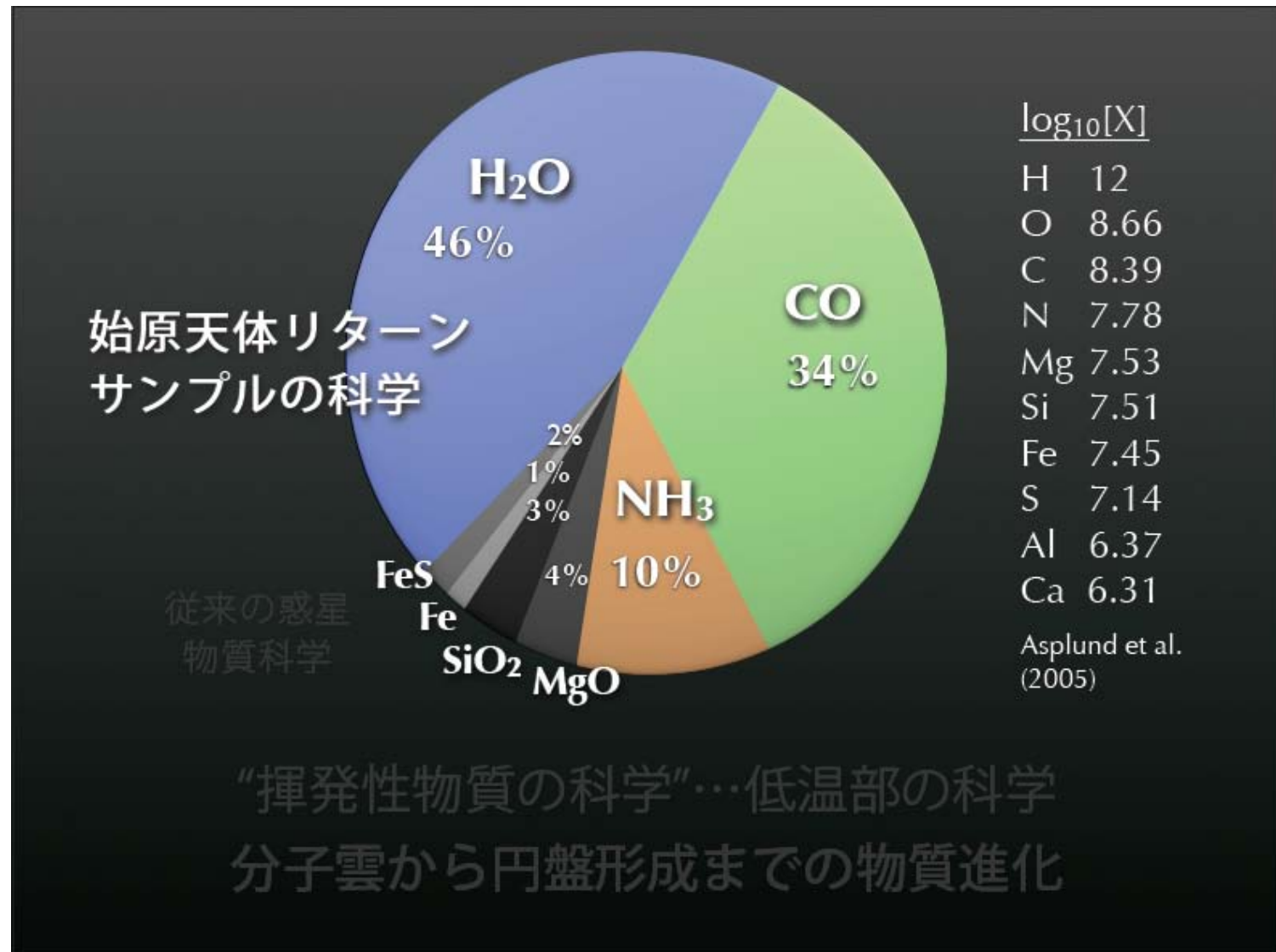
観測機器主要諸元一覧

分類	項目	レーザー測距	多バンド可視カメラ	近赤外分光計	中間赤外カメラ	小型ローバ
機械的I/F	サイズ	240 x 228 x 250 mm	240 x 130 x 130 mm	335 x 165 x 100 mm (分光器部のみ)	200 x 150 x 100 (Foodを除く)	φ180[mm] x 150[mm] (本体のみ)
	質量	3.7 kg	1.61kg (+ONC-AE 1.01kg and ONC-E 3.66kg)	約4.4kg	約4.0kg	約3.5kg(含むOME)
電気I/F	消費電力	17 [W] (ヒータを除く)	<4.57 W (+ONC-AE <35W and ONC-E 26W)	30.5 W (TBD)	23.7 W (TBD)	5W (TBD)
データI/F	データ発生量	1pps (4Byte/s: 測距2、強度1、 ステータス1)	3MB/day。特殊運用時は数 10MBをDR記録。	21bps (25s毎に0.52 kB)	1MB/day(=7MB/week)程度。 特殊運用時は数10MBをDR 記録	
	必要回線速度		1Mbyte/sec以上 (AMICA→DR)			
性能	計測概要	小惑星表面へ探査機間の距離を測定	フィルタを用いて複数の波長帯の画像を取得する。	3μmをふくむ波長範囲の分光を行い、H ₂ O/OHの存在、分布を計測する。	中間赤外スペクトル及び画像から温度と温度分布を計測する。	CCDカメラ×3(望遠、接写)温度計×6
	視野	1.7 mrad (0.097°)	5.7° × 5.7°	0.1° × 0.1°	5.7° × 5.7° (TBD)	47° × 36°
	空間分解能	—	2m/pixel@HP(高度20km)	35m@HP(高度20 km)	2m/pixel@HP(高度20km) (TBD)	—
	画素数	—	1024x1000	1 × 128	344 × 260	有効画素: 768 × 494 出力画素: 640 × 480
	観測波長範囲	—	1000nm、~700nm、UV	1.7~3.4 μm (TBD)	8~12 μm	可視
	波長分解能	—		20 ~ 50 nm	≤ 1 μm幅	—
	その他	計測距離: 50 ± 1m - 50 ± 0.01km 計測周波数: 1Hz			観測温度範囲: 220~400K (TBD) 絶対温度精度: 1K	観測温度範囲: -200~200°C
	特殊要求運用要求	ミッション運用期間中に自由落下計測を行うこと。	衝突前後に詳細な地形マッピング運用を行うこと。	センサ温度を-60°C以下 (TBD) に制御できるようレイアウトを検討すること。		
その他	TRL	6~8 (はやぶさのヘリテージ)	6~8 (Hayabusa/ONC、Planet-C/UVIのヘリテージ)	3 (検出器は新規開発)	6 (Planet-C/LIRのヘリテージ)	6 (はやぶさ/MINERVAのヘリテージ)

ミッションフェーズの運用シナリオ

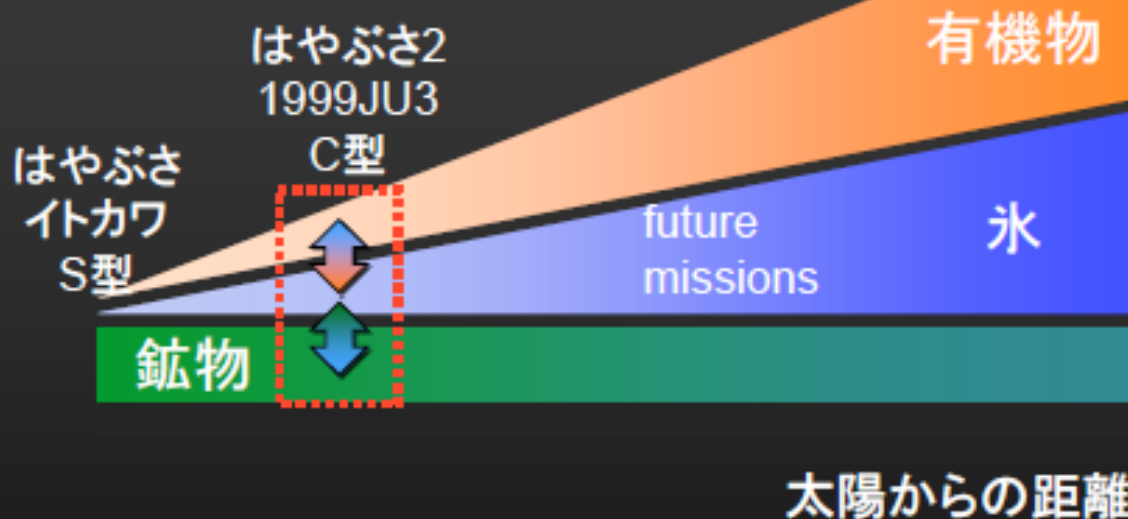


始原天体サンプルリターンの意義



始原天体サンプルリターンの意義

これまでの惑星物質分析が及んでいない固体物質
“揮発性物質の科学”



始源物質 - 鉱物・水・有機物の相互作用

- ・材料物質の進化 = 円盤 / 母天体での相互作用
- ・相互作用ゆえに構造をつくり, “材料”となった

はやぶさ2リターンサンプルで期待される科学

リターンサンプルで解明する相互作用

鉱物 — 水・有機物 相互作用

マトリクス物質化学組成分析による小惑星物質の始源度の推定、プレソーラーグ레인種類・存在度、相互作用年代測定

有機物 — 鉱物 相互作用

小惑星内部の有機物と鉱物の分布状態を調べる

有機物 — 水 相互作用

小惑星内部のアミノ酸前駆物質、カルボン酸、糖のキラリティー、分子・同位体組成を調べる

水 — 鉱物 相互作用

小惑星水、炭酸塩の水包有物リターンサンプルによる始原水の酸素、水素同位体組成推定 / 始源物質の水質変成作用解明

水 — 鉱物 — 有機物 相互作用

水・有機物・鉱物の酸素同位体組成を調べる

宇宙風化作用

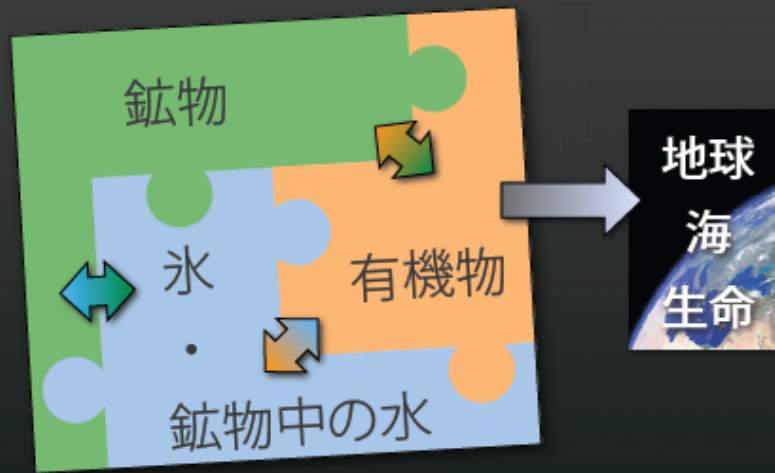
C型小惑星の表層物質の宇宙風化物質と衝突後もしくは、巨礫内部のフレッシュな試料を比較し、宇宙風化の程度を調べる

衝撃変成作用

衝撃による鉱物・有機物の変成、希ガス組成の変化、それらの相関を調べる

はやぶさ2リターンサンプルで期待される科学

はやぶさ2リターンサンプルで期待される科学



地球－海－生命の
材料物質

リターンサンプル
無機鉱物－氷－有機物がつくる
ミクロシステムの総合理解

リモートセンシング
鉱物－氷－有機物
マクロシステム
の理解

はやぶさ2サンプリングチームの取り組み

2020年代の最先端惑星物質科学に向けて

- ✓ はやぶさサンプリング方式の改良
 - 弾丸型サンプリング収率向上
 - バックアップサンプリング方式開発
- ✓ カプセル密封性向上・揮発性物質キュレーション
- ✓ 10年後を見据えた局所分析・非破壊分析
 - 放射光施設の有機物分析ライン
 - 中性子イメージング・ミュオン元素分析

はやぶさ2サンプリングチームの取り組み

2020年代の最先端惑星物質科学に向けて

サンプリング

弾丸撃ち込み
サンプルホーン
とりもち

サンプル コンテナ

密封性
揮発性成分採取
汚染管理

分析技術

キュレーション
施設・手順
手法開発

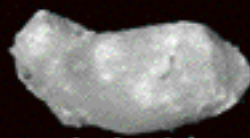
太陽系の始まりの調べ方

月・火星等の分化天体では解明できない、太陽系誕生時の物質・構造・環境・変遷を解き明かすのが、始原天体の役割

原始太陽系円盤の誕生

現在の太陽系の完成

始原天体



(はやぶさ)

地球型惑星原料
(S型小惑星)



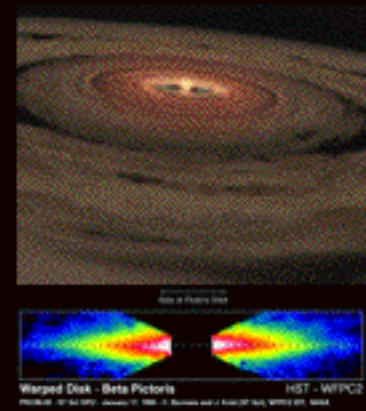
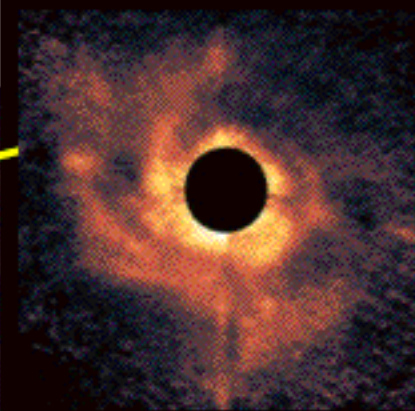
(はやぶさ2、ソーラーセイル)

木星型惑星原料
生命前駆物質
(C,P,D型小惑星)

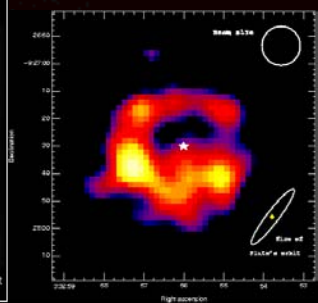
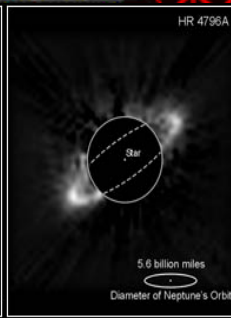
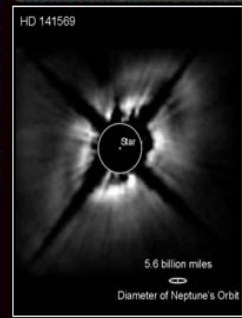
氷天体原料
生命前駆物質
(彗星核)



原始惑星系円盤 (SPICA)



微惑星形成
(系外惑星系検出)



現在の学術分野と 探査・探索対象の分担

始原天体探査

固体天体の内部構造探査

