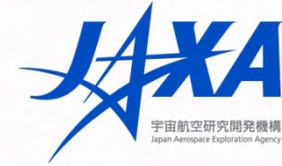


# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.6 観測機器設計要求(1/2)



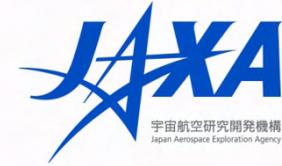
### 各観測機器の観測項目

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。 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。

\* バス機器であるがサイエンス観測にも使用する。

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.6 観測機器設計要求(2/2)

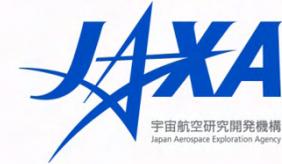


### 主要諸元一覧(観測機器仕様)

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
性能	計測概要	小惑星表面～探査機間の距離を測定する	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、水の存否を計測する	中間赤外画像から表面温度と熱慣性を計測する	小型カメラと温度計と搭載し表面の詳細地形と温度計測を行う
	視野	1.7 mrad(0.097°)	5.7° × 5.7° 撮像可能範囲6.35x6.35°	0.1° × 0.1°	12° × 16°	47° × 36°
	空間分解能	—	2m/pixel@HP(高度20km)	35m@HP(高度20 km)	18m/pixel@HP(高度20km)	—
	画素数	—	1024x1024	1 × 128	320x240(有効画素)	有効画素: 768 × 494 出力画素: 640 × 480
	観測波長範囲	—	ul,B,V,W,X,Pバンド他	1.8～3.2 μm	8～12 μm	可視
	波長分解能	—	—	20 ~ 50 nm	—	—
	その他	計測距離: 50±1m - 50±0.01km 計測周波数: 1Hz				観測温度範囲: 250～400K 相対温度精度: 0.5K 絶対温度精度: 5K
その他	特殊要求 運用要求	ミッション運用期間中に軌道計測を行うこと。	衝突前後に詳細な地形マッピング運用を行うこと。高度1km以下で数枚以上、光学画像にて撮像する。	センサ温度を-80°C以下、光学系温度を-60°C以下に維持すること。2次元スキャン運用が行えること。高度1kmでスキャン運用が行えること。		

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.7 「はやぶさ」Lessons Learnedの取り込み

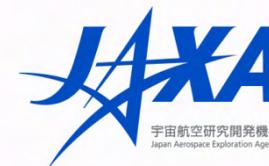


「はやぶさ2」開発方針に基づき、「はやぶさ」Lessons Learnedを取り込んで、設計に反映した。これにより信頼性、運用性を確保する。  
 主要なLessons Learned反映事項を下記に示す。

反映項目	「はやぶさ」Lessons Learned / 「はやぶさ2」の変更点
【姿勢軌道制御系】 リアクションホイール(RW)の4台搭載	「はやぶさ」では、リアクションホイールが3台中2台故障したことを踏まえ、リアクションホイールを4台搭載し、冗長性を向上させる。
【姿勢軌道制御系】 恒星センサの2台化と精太陽センサの廃止	恒星センサを2台搭載し、姿勢決定精度を向上させるとともに冗長性を向上させる。その代わりに機能が重複している精太陽センサを廃止する。
【姿勢軌道制御系】 太陽電池パドル下の障害物センサを廃止	「はやぶさ」で発生した障害物センサの誤検知を反映して、同機能を廃止する。「はやぶさ」のタッチダウン運用実績から、障害物センサ非搭載でも地上からの遠隔誘導、搭載航法カメラ、LRF、ターゲットマーカ(TM)によりタッチダウン可能である。
【姿勢軌道制御系】 LRF(Laser Range Finder)の追加	「はやぶさ」運用経験から探査機直下をセンシングするLRFがあると有効であったとのLessons Learnedを踏まえて、LRFを1台追加し、3台搭載する。
【化学推進系】 化学推進系配管経路の見直し	「はやぶさ」のタッチダウンにおける燃料(ヒドラジン)漏洩を踏まえて、化学推進系配管ルーティングの主系/従系の分離を行い、冗長性を向上させる。
【サンプル】 キャッチャーおよびコンテナ内壁の鏡面研磨	「はやぶさ」のキュレーション作業の経験を踏まえて、「はやぶさ2」ではキャッチャーおよびコンテナ内壁を鏡面研磨し、分解しやすく、また、微小試料の採集も容易にする。

# 4. システム選定と基本設計要求

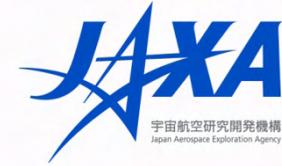
## 4.8 はやぶさ2の技術成熟度と評価計画(1/3)



サブシステム	主要機能	実績等	はやぶさ(既存設計)からの変更点	海外機器	はやぶさ2での評価計画
構体系	機械環境の維持	はやぶさ	搭載機器が増えたためZ方向に150m延長		PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
姿勢軌道制御系	姿勢軌道制御、マヌーバー、着陸航法誘導制御	はやぶさ	RWの4台化、恒星センサの2台化と精太陽センサの廃止、障害物センサ廃止、LRFの1台追加し3台搭載、姿勢軌道制御系計算機の2重冗長化、1999JU3への適合化、枯渇部品の変更	恒星センサ、リアクションホイール、慣性基準装置,粗太陽センサ	PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
化学推進系	姿勢制御トルク、軌道推進力の発生	はやぶさ	配管ルーティングの主系/従系の分離、あかつきの不具合対応を適宜取り込む	高圧遮断弁、推葉弁	PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
イオンエンジン系	軌道推進力の発生	はやぶさ	高推力化		商用化製品を採用
通信系 (X帯)	X帯通信(UP/Down)	はやぶさあかつき	枯渇部品対応としてHGAの平板アンテナ化、MGAの2軸ジンバル化、母船分離機器の母船側通信系共用化	X帯スイッチャーキュレータ	PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
(Ka帯)	Ka帯のDown Link	きずな	枯渇部品対応	カブラ	PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
データ処理系	データ符号化、伝送、記録	はやぶさ小型衛星	枯渇部品の変更、高速処理化容量増強		PFM1段階開発方式。PFT試験を実施。
電源系	日照時、日陰時の電力供給	はやぶさあかつき	太陽電池セルの変更、電池の容量変更等	太陽電池セル	パドルは要素試験を実施。電池は試験用BATを製造し確認。他はPFM1段階方式

# 4. システム選定と基本設計要求

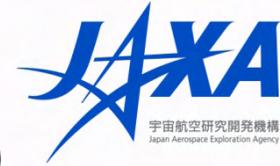
## 4.8 はやぶさ2の技術成熟度と評価計画(2/3)



サブシステム	主要機能	実績等	はやぶさ(既存設計)からの変更点	海外機器	はやぶさ2での評価計画
熱制御系	熱的環境の維持	はやぶさ 小型衛星	搭載機器増に伴い配置変更、ヒータ・ヒータ制御装置追加、ヒーター制御回路はピークパワー制御に変更		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施
レーザー測距	小惑星の表面形状・荒さ計測、軌道計測	はやぶさ	同等		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。
多バンド可視カメラ	地形マッピング、鉱物分布計測	はやぶさ	1999 JU3 への対応		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。
サンブラ	小惑星物質の採取	はやぶさ	収量増加対策、鏡面研磨仕上げ、1999 JU3 表面材料適合化		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。
再突入カプセル	サンプルの回収	はやぶさ	枯渇部品の変更		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。
衝突装置	クレータの生成	新規	新規		要素開発、P F M 開発方式。P F T 試験を実施。
近赤外分光計	水氷、含有鉱物の探索、分布の観測	新規	新規		E M - P F M 開発方式。P F T 試験を実施。
中間赤外カメラ	表面温度、熱慣性の観測	あかつき	1999 JU3 への対応		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。
小型ローバー	微小重力天体上の移動技術実証	はやぶさ	部品の信頼性の向上		P F M 1 段階開発方式。P F T 試験を実施。

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.8 はやぶさ2の技術成熟度と評価計画(3/3)



- はやぶさに搭載されていなかった機器は以下の通りである。
  - ①衝突装置
  - ②Ka通信系
  - ③近赤外分光計
  - ④中間赤外カメラ
- このうち新規技術開発を要する機器は、衝突装置、近赤外分光計である。
  - 衝突装置は、爆薬部など実験室環境以上の実績はないが、他分野で実績のある技術であり、実現性はある。
  - 近赤外分光計は、コンセプト実証以上の実績がないが、はやぶさ搭載近赤外分光計からの機能向上(波長域変更)であるため、実現性はあると判断する。センサ及び周辺回路の試作を行い、課題の抽出とリスクの低減を図る。

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(1/9)

### (1) 衝突装置トレードオフ

		独立型 (二機運用)	搭載型(一機運用)		
			衝突型	炸薬型 ペネトレータ	掘削型 掘削
概要		独立型インパクトによるクレータ生成	運動量によるクレータ生成	炸薬によるクレータ生成 ペネトレータ+炸薬	着陸帰還機による掘削&サンプリング
サンプル汚染 (熱、化学反応)		△ 残推薬等の管理が必要	○ 金属固体弾丸が衝突	× 爆薬ガスによるクレータ生成	◎ 火薬を全く用いない
科学観測	地下物質曝露・観測	○ はやぶさ1号程度の観測可	○ 高解像度観測が必要	○	×
	内部構造探査	◎ 観測規模大、振動付与○	○ 観測規模Local、振動付与△	○ 観測規模Local、振動付与×	○ 地層採取可能
	クレータサイズ	○ クレータ内試料採取 予想直径: ~20 m程度	△ クレータ周辺試料採取 予想直径: 数m程度	△ 予想直径: 数m程度	-
安全性		○ 通常の探査機レベル	△ 爆薬を使用	△ 爆薬を使用	○ 通常の火工品
技術リスク(要素)		○ ほぼ既存の技術で可能	○ ほぼ既存の技術で可能	× 新規開発要素:多	× 新規開発要素:多
技術リスク(システム)		海外ミッションでの実績有り	地上防衛分野で実績あり	システムとしての実現例無し	システムとしての実現例無し
その他の メリット・デメリット		○ 衝突型に比べ、着陸帰還機の安全領域が広い(イジェクタのみ退避) ○ 衝突中観測が可能 × 衝突場所は選べない × 母船と併せ2機同時運用が必要	○ 衝突時期、場所を選べる ○ スタンドオフ距離が自由 ○ 瞬時に加速するため、特別な命中誘導が不要 × 衝突中観測の運用要求が厳しい × 作動時に破片が飛散するため、着陸帰還機は退避	○ 衝突時期、場所を選べる ○ 衝突型に比べ、着陸帰還機の安全領域が広い × 炸薬の貫入/設置が難しい × ペネトレータを小惑星へ誘導する技術が困難	○ サンプル取得時期・場所を選べる × 大規模な着陸帰還機改修が必要 × 掘削時の着陸帰還機の固定・熱制御が難しい
コスト		×	○	×	△

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(2/9)

### (2) 概要

◆はやぶさ2の衝突装置への要求は、

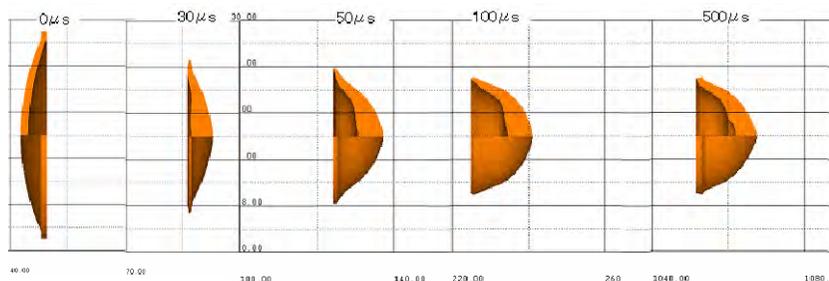
▶着陸帰還機のカメラで撮影を行った際に、その大きさ・形状を測定できる程度の大きさのクレーター(直径2m、深さ50cm程度)を形成すること。

▶サンプリングが可能な表面を新たに露出させること。

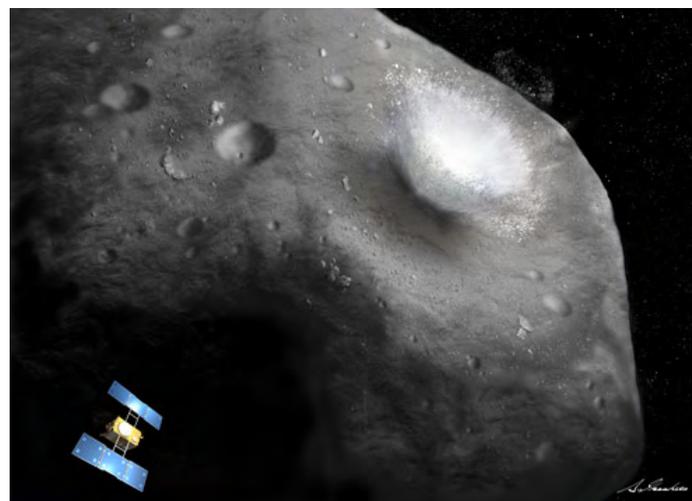
本機器は、小惑星上空(高度数100m)で分離されたのち、作動し、爆薬のエネルギーにより衝突体を高速で飛翔させ、小惑星表面に衝突させる。

作動の際には爆薬により、構成品は破壊され、破片が高速に四散するため、着陸帰還機は衝突装置分離後に、分離地点から離れ、衝突装置の破片が当たらない位置(小惑星の陰)に退避することで、安全性を確保する。

◆ 衝突装置の開発方針は、既存の技術を応用できる部分は活用するとともに、JAXAで経験のない爆発成形のメカニズム、爆薬部設計・製造性については、爆薬部小型モデルによる衝突試験(平成21年度)(本文53-55ページ参照)、爆薬部設計、爆薬部製造性確認等をフロントローディングとして実施し、これらを踏まえて確実な開発を期する。



衝突体(金属ライナ)の形状(起爆からの経過時間と形状)



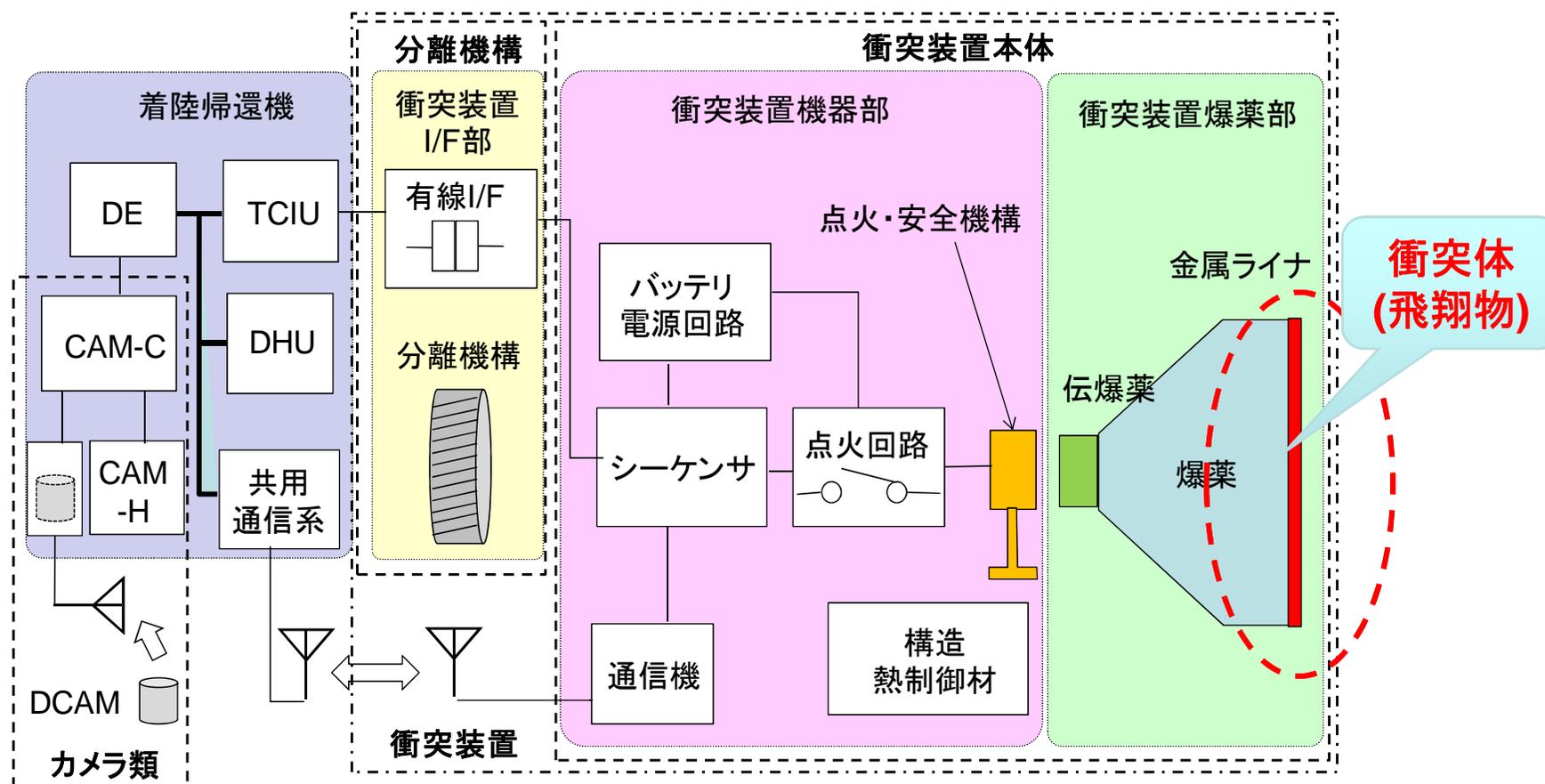
# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(3/9)

### (3) 構成

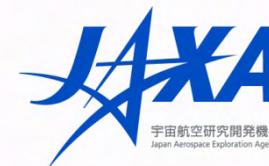
衝突装置: 爆薬部、機器部、分離機構からなる。

カメラ類: 分離カメラ(DCAM)、カメラコントローラ(CAM-C)等からなる。



## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(4/9)



#### (4)仕様

##### 衝突装置の仕様

質量: 20kg以下(分離機構含む. 18kg目標)とする。

サイズ:  $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 程度(分離機構含めての最大径は400mm以下)

衝突体: 銅、速度2km/s、質量2kgもしくは同等の衝突エネルギーを得ること。

分離速度: 垂直方向速度0.15m/s以下で分離すること。

分離性能: 0.05m/s(分離方向)、0.02m/s(分離直行方向)、ニューテーション  
10deg以下とすること。

分離後寿命: 1時間以上有すること。

安全機構: シャッタによる伝爆路の遮蔽. ARM→SAFEは要求しない。

点火シーケンス管理: シーケンサ及び無線機による管理を行えること。

通信距離: 5km以上通信できること。

# 4. システム選定と基本設計要求

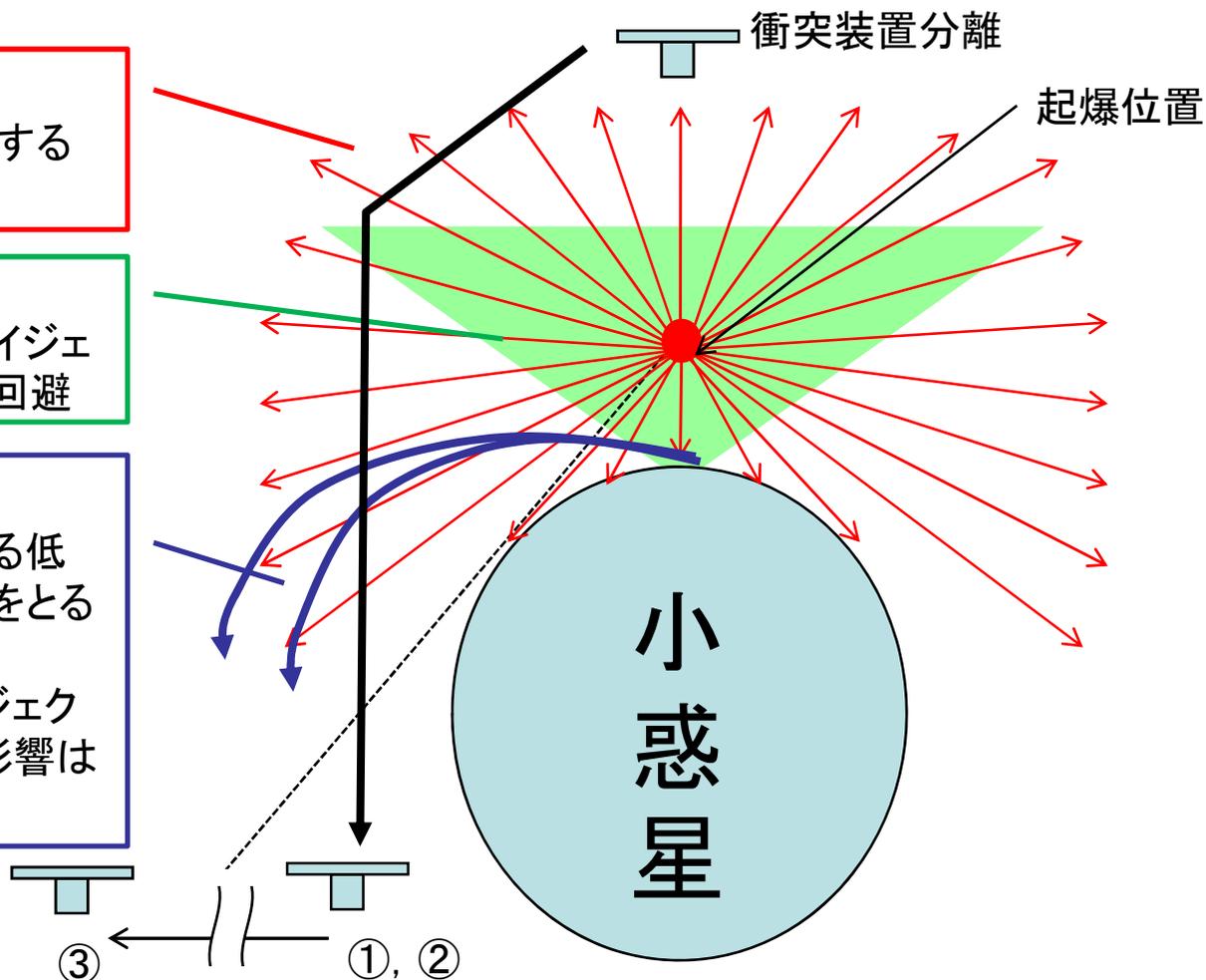
## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(5/9)

(5) 衝突運用概要: 衝突装置は作動時に破片を四散させ、衝突体は小惑星表面に着弾すると土壌を放出させるため、着陸帰還機は衝突装置分離後、小惑星の陰に退避する。

① デブリ回避  
搭載型衝突機の起爆時に飛散するデブリは小惑星の陰で回避

② 高速イジェクタ回避  
衝突体衝突時に発生する高速イジェクタは①とともに小惑星の影で回避

③ 低速イジェクタ回避  
軌道運動を行って回り込んでくる低速イジェクタは小惑星との距離をとることで回避。  
超高高度まで飛散する低速イジェクタは速度が小さいため衝突の影響は小さいうえに、衝突確率は低い



# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(6/9)

### (6) 着陸帰還機への要求

#### 着陸帰還機への要求

搭載位置: 着陸帰還機-Z面

分離時高度: 退避中に衝突装置が地面に到達しない高度(高度数100m)

分離時位置速度姿勢

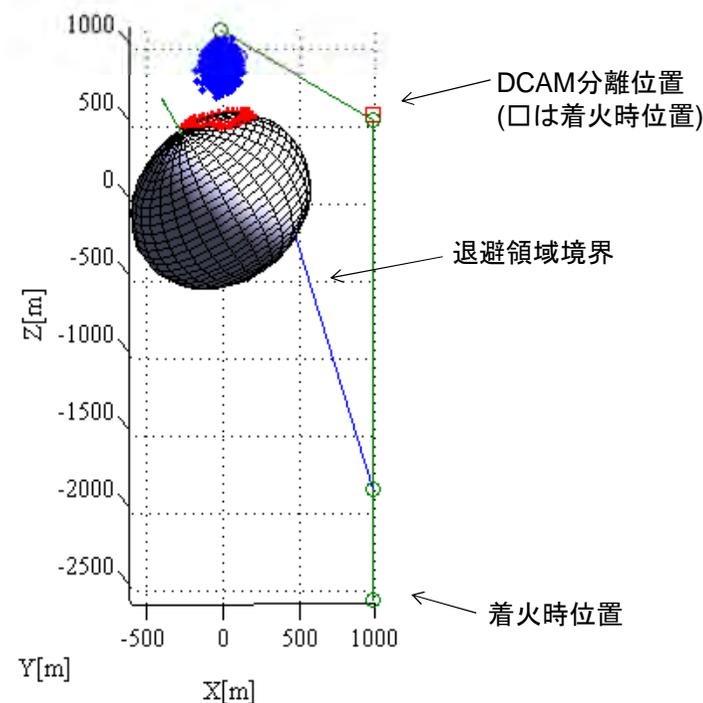
- ・ 慣性系に対し静止するように分離
- ・ 水平速度: 0.05m/s、垂直速度: 0.02m/s
- ・ 水平位置: 10m、垂直位置: 30m
- ・ 姿勢: 0.5deg

退避マヌーバ: 40分程度

- ・ DCAM分離位置まで移動後、静止、DCAM分離
- ・ DCAM分離後安全領域への退避

HPへの復帰

- ・ 小惑星の再補足及びHPへの復帰マヌーバ

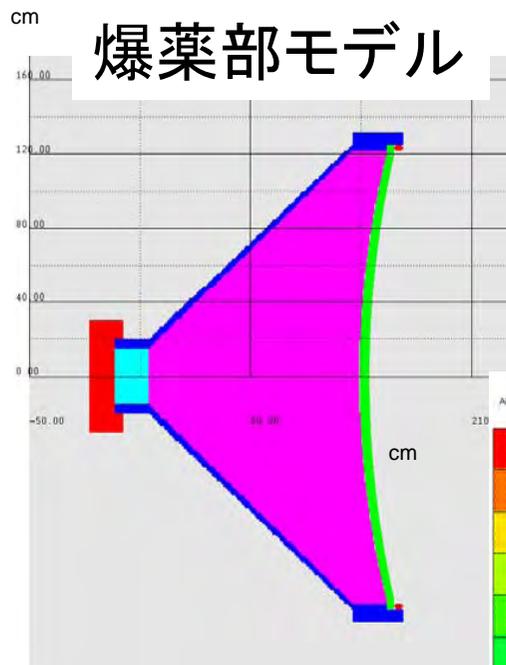


# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(7/9)

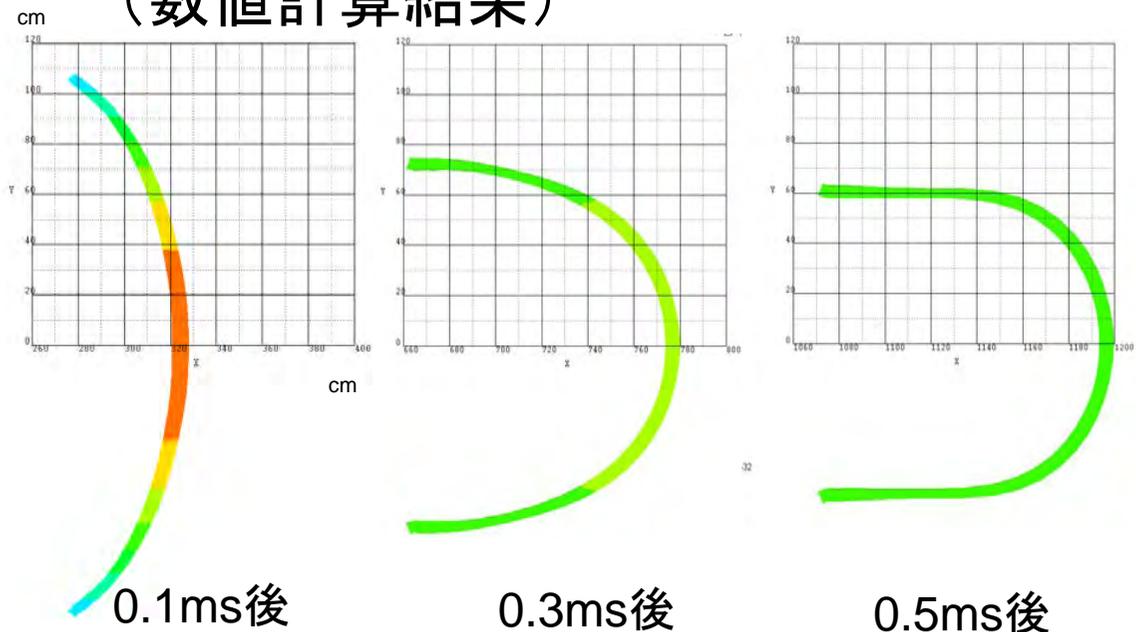
### (7) 衝突装置のフロントローディング実施結果(爆薬部設計)

◆ 要求: 起爆後、衝突体が分裂することなく、速度2km/s程度で飛行可能



- 爆薬部の設計を行い、数値シミュレーション用のモデルを作成
- 数値計算の結果、0.5ms後にはライナの形成が終了し、分裂することなく、速度2km/sで飛行することを確認。

### 起爆後の衝突体形状 & 速度コンター (数値計算結果)

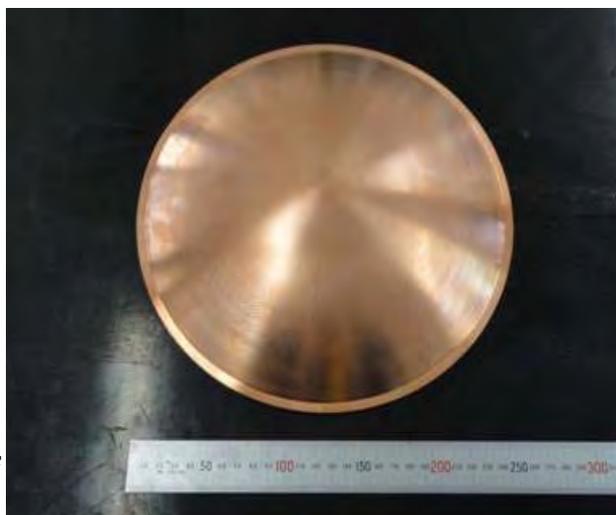
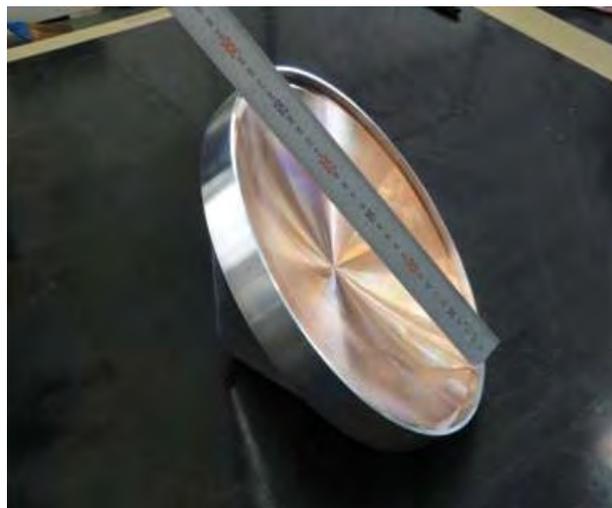


# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(8/9)

### (7) 衝突装置のフロントローディング実施結果(爆薬部製造性確認、切削加工試験)

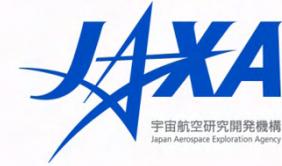
▶ 1/2スケールモデル、1/1スケールモデルでの試作により、材料物性データの取得、加工性能の検証等を実施し、製造性を確認した。



1/1モデル切削加工試験写真

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(9/9)



### (8) 今後の開発計画

- 機械系
  - 構造体: 極力軽量化することが求められるため、EM品を製造し、強度剛性試験を実施する。
  - 分離機構: 過去の実績から、要求性能の十分な達成見込みがあるため、一啗前に分離試験を行い分離性能の確認を行う。
  - 点火安全機構: 火工品を用いたワンショットアイテムであるため、ロット受入れ試験により保証する。
- 電気系
  - 点火回路: 「あかつき」と共通の設計としており、EMIは作成しない。
- 爆薬系
  - 1/2スケール実爆試験(※)・実スケール実爆試験を平成23年度に神岡試験場にて実施。(静爆試験を実施して衝突体を生成させ、高速度カメラ及び検速的で衝突体の速度および形状を求め、数値計算と比較して設計データを取得する。)
  - 爆薬の耐環境性(耐放射線性、耐真空性)については平成23年度に試験を行い評価する。

(※ 爆薬量を1/8に抑えた1/2スケールモデルで、試験環境、安全性の確認を行い、安全性が確認された上で実スケールモデルでの実爆試験を実施する。)

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(推進部会助言に対する回答)

#### 推進部会の助言

衝突体発出装置は今回のミッションの成否を握る重要な技術要素と考えるが、小惑星の地表面情報が限られているなかで、どの程度地上試験が有効か見極める必要がある。また、衝突体の発出方法についても更なる工夫を検討すること。

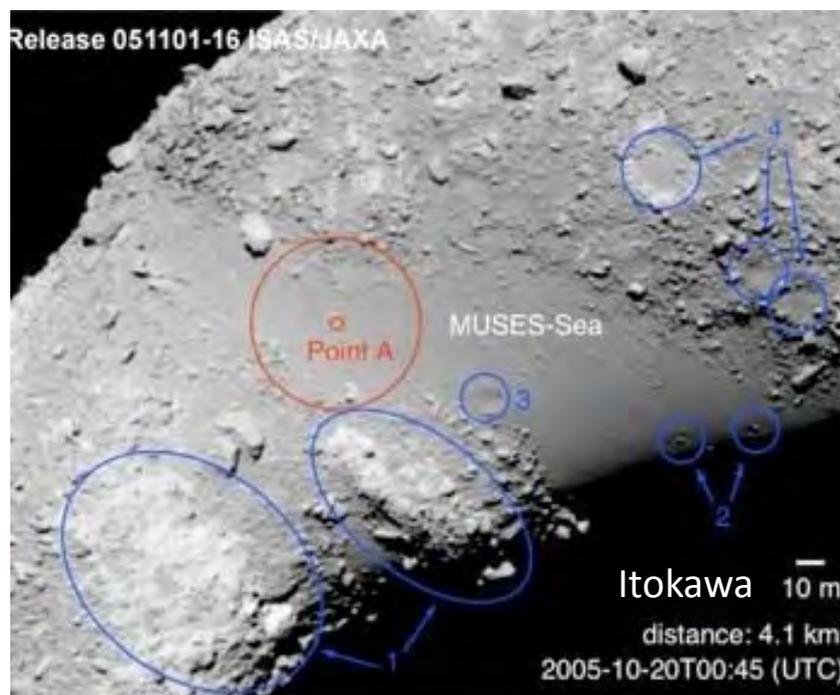
回答: 次ページ以降(53-55頁)に示す。

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(推進部会助言に対する回答)

#### (1) 小惑星の表面状態

月や小惑星などの固体天体表面は、惑星形成過程で、衝突と再集積を繰り返し、その表面が微細なレゴリスという表土に覆われていると考えられます。例えば、月の場合、平均~100ミクロン程度のレゴリスで覆われていることが分かっています。小惑星のように小さい天体では、衝突で巻き上げられた微細な破片は容易に天体全土にばらまかれると考えられます。このように、小惑星表面は、広い領域で、砂礫で覆われていると考えられています。さらに、イトカワのように小さな小惑星では、衝突による振動で、砂礫が特に多く集積した平坦な地域があると考えられています。下の写真のように、ミューゼスの海(MUSES-Sea)領域のような、より微細な破片(砂礫)が集まった領域の存在が観測されています。



はやぶさ探査機により撮影された小惑星イトカワの画像。中央に見えるのがミューゼスの海と呼ばれる砂礫が存在する領域です。

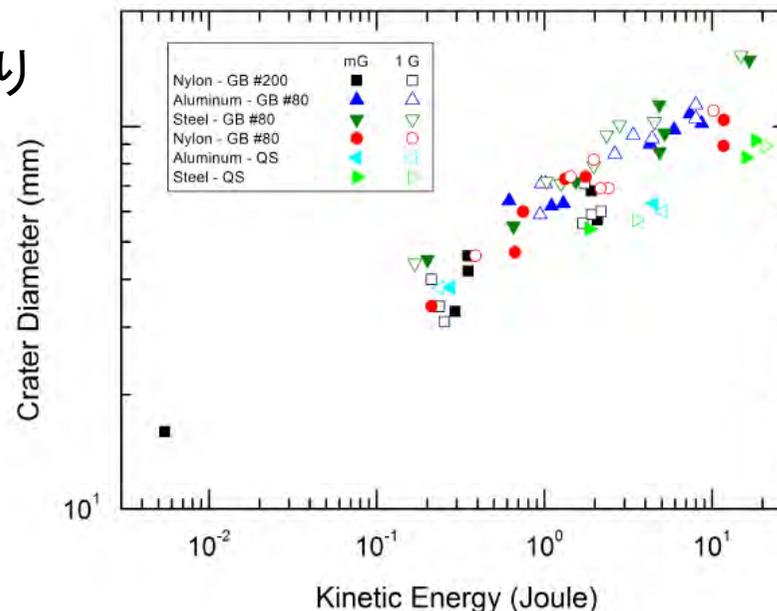
# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(推進部会助言に対する回答)

### (2) 小惑星に形成されるクレーター直径の見積り

探査機がタッチダウンしサンプルを採取可能な領域は、小惑星の平坦な地域に限られます。はやぶさ2対象天体は、大きさがイトカワの2倍程度で、同程度の衝突を経験していると考えられます。よって、その表面には、イトカワ同様微細なレゴリスで覆われている領域があると考えられます。そこで、このような小惑星に形成されるクレータサイズを予想するため、衝突装置を模擬した弾丸を小惑星表面模擬試料(砂礫)へ衝突させる衝突実験を行っております(右図は実験結果)。小惑星表面のレゴリスの粒径にはばらつきがある可能性があり、粒径により、クレーター形成にどのような影響があるのか調べる必要があります。そこで、本実験では、粒径を変えた砂試料で実験をし、結果を比較しています。結果として、ほとんど差異は認められず、

小惑星上のクレータ形成サイズは、表面粒度には影響されにくいと考えられます。なお、イトカワのYoshinodaiのような岩盤に衝突する場合にも備え、衝突体よりも大きな岩石への衝突試験も実施中です。なお、衝突装置ライナ(弾丸)の衝突エネルギーで砂層に直径2~4mのクレータが形成されることがこれまでの実験結果および数値シミュレーションから示されており、はやぶさ2搭載のカメラで充分観測可能なサイズとなっています。



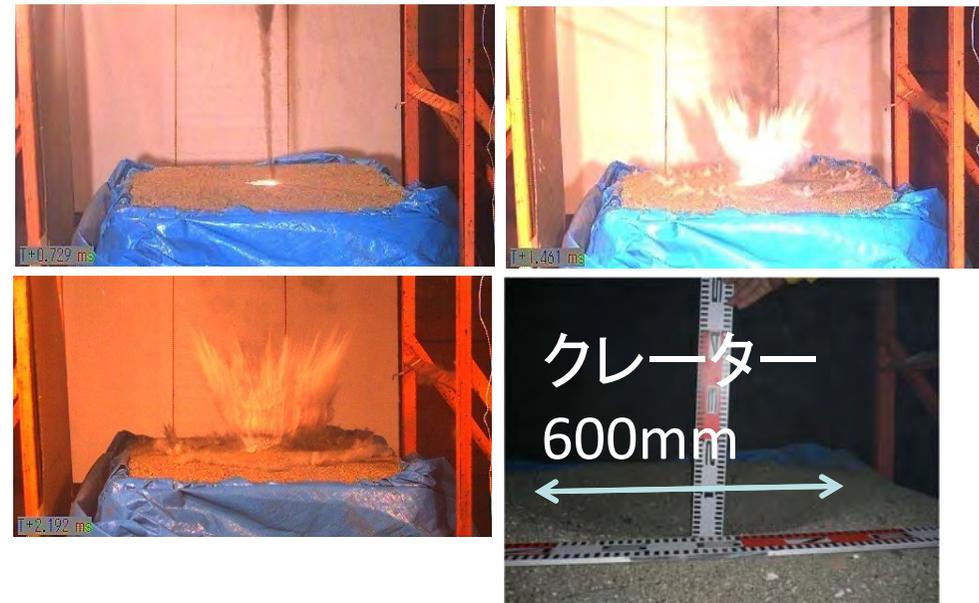
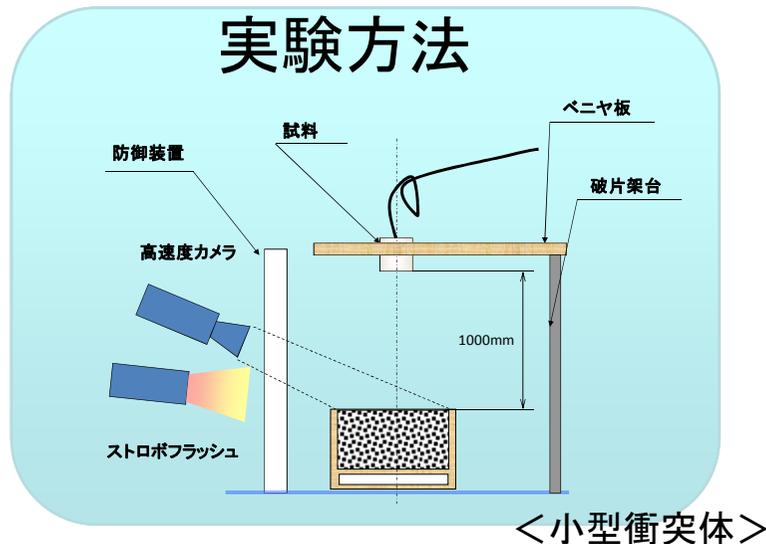
粒径の異なる砂へのクレータ形成実験結果。クレータサイズと弾丸の運動エネルギーの関係を示す。

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(推進部会助言に対する回答)

### (3) 衝突装置スケールモデルを用いたクレーター形成実験の実施

はやぶさ2衝突装置を模擬し、クレータ形成実験を行うため、スケールモデルを用いて砂へのクレータ形成実験も行っています。また、衝突体の発出方法については、爆薬の充填方法やケース構造、ライナの厚みなどを調整し、より良い精度でライナが発射される工夫を行っております。



ライナ(銅)

ライナ直径:

50mm(鍛造前)

20mm(鍛造後)

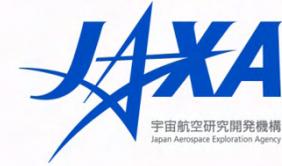
ライナ速度: 2100m/s

同条件で数値計算も行ったところ、本実験で得られたクレーターサイズと同程度の大きさのクレーターが形成された。

⇒数値計算と実験結果の良い一致を確認

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(1/7)



#### (1) 概要

◆ 近赤外分光計の主目的は、小惑星表面を3ミクロン帯を含む近赤外線波長帯の分光観測を行い、小惑星表面の水・含水鉱物の分布量を求めることである。

試料採取地点の選定のための水・含水鉱物マップの作成、及び衝突装置によって暴露される表層地下物質の水・含水鉱物の検出を行う。

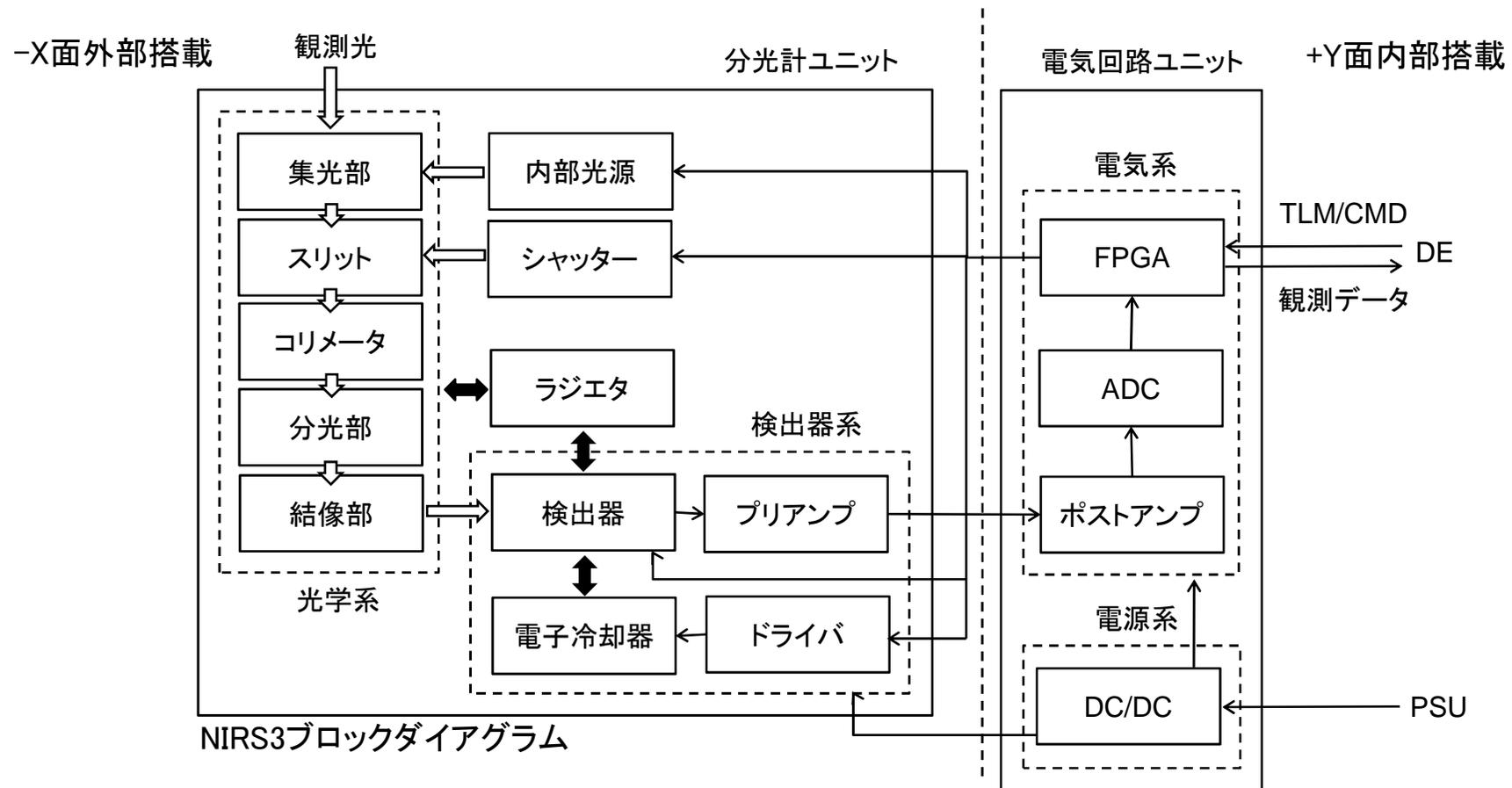
◆ 開発方針としては、短期開発の必要性からはやぶさに搭載した近赤外分光計(NIRS)の基本設計を踏襲し、3ミクロン帯の観測に必要な設計変更のみ施すことを前提とする。

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(2/7)

### (2)構成

近赤外分光計は、小惑星表面の観測光を分光する分光計ユニットと観測データを電気信号に変換する電気回路ユニットから構成される。



# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(3/7)

### (3)仕様

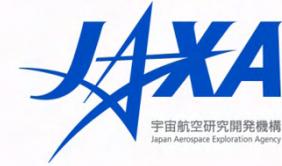
	項目	値
光学系	観測波長範囲	1.8-3.2 $\mu$ m
	波長分散	20nm
	視野全角	0.1°
	集光系開口	$\Phi$ 30mm
	総合F値	F1.0
	効率	50%
	結像性能	RMSスポット径 13 $\mu$ m以下
	光学系方式	全屈折式光学系
	分散素子	グリズム
検出器	画素数	1 x 128 pixels
	画素ピッチ	50 $\mu$ m
	画素高さ	100 $\mu$ m

空間分解能	35m@20km 2m@1km
-------	--------------------

寸法	S 335x165x100mm AE 141x140x50mm
質量	S 3.9kg AE 0.5kg
消費電力	30.5W

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(4/7)



### (4) 技術的に困難な要素技術・課題

- 放熱板による分光計の低温冷却  
近赤外域であるが装置内部の熱放射及び検出器の暗電流を抑制するため、光学系と検出器をそれぞれ-60°C以下、-80°C以下まで冷却する必要がある。リソース低減を考慮して機械式冷凍機は使用せず、これらの温度条件を放熱板による受動的冷却で実現させる。
- 低温耐性シャッターの開発  
可動部であるシャッターは「はやぶさ」の近赤外分光計にも搭載されたが、低温環境での動作は確認されていないため、海外の惑星探査機で搭載実績のある音叉型チョッパーを用いて新たに低温耐性のあるシャッターを開発する。

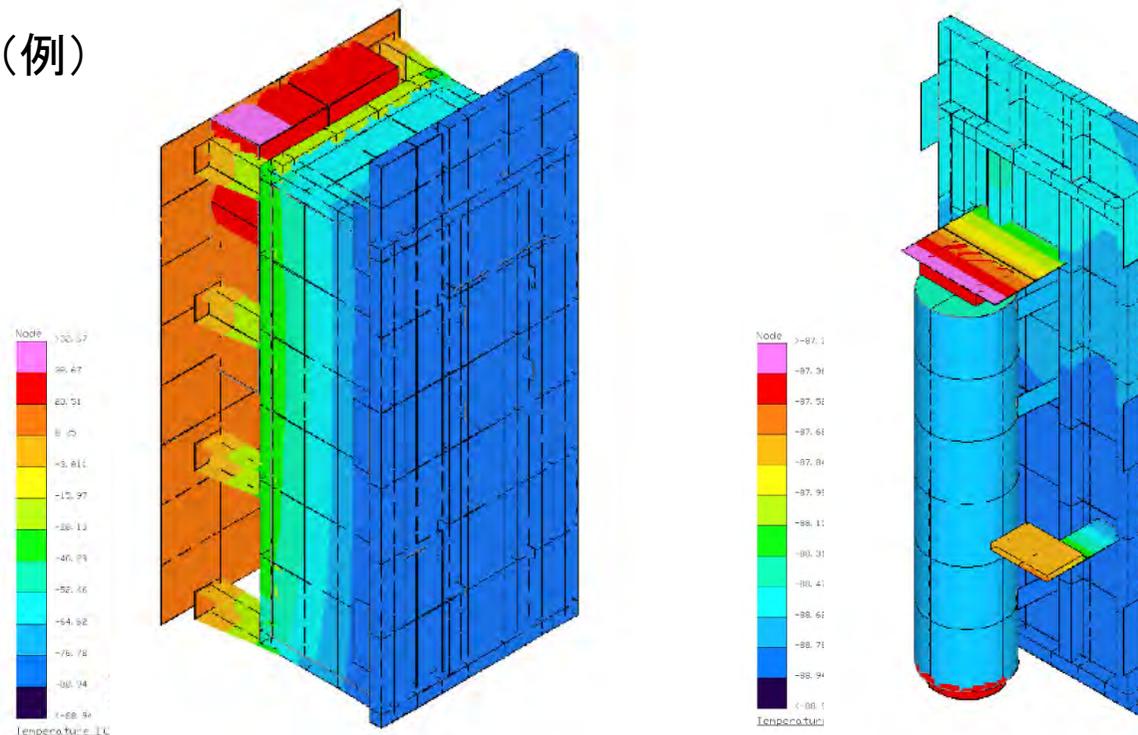
# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(5/7)

### (5) 現状の開発状況(1)

- 分光計の熱解析  
熱数学モデルの解析から小惑星観測時において高度1km以上で要求温度条件を満たすことを確認した。

分光計の温度分布(例)



# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(6/7)

### (5)現状の開発状況(2)

- シャッター要素試験  
低温耐久試験と振動試験を実施して、温度・振動の条件に対して十分耐え得ることを確認した。



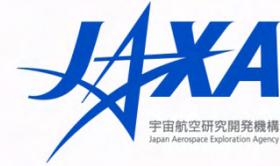
恒温槽を用いた低温耐久試験の様子



振動試験の様子

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(7/7)



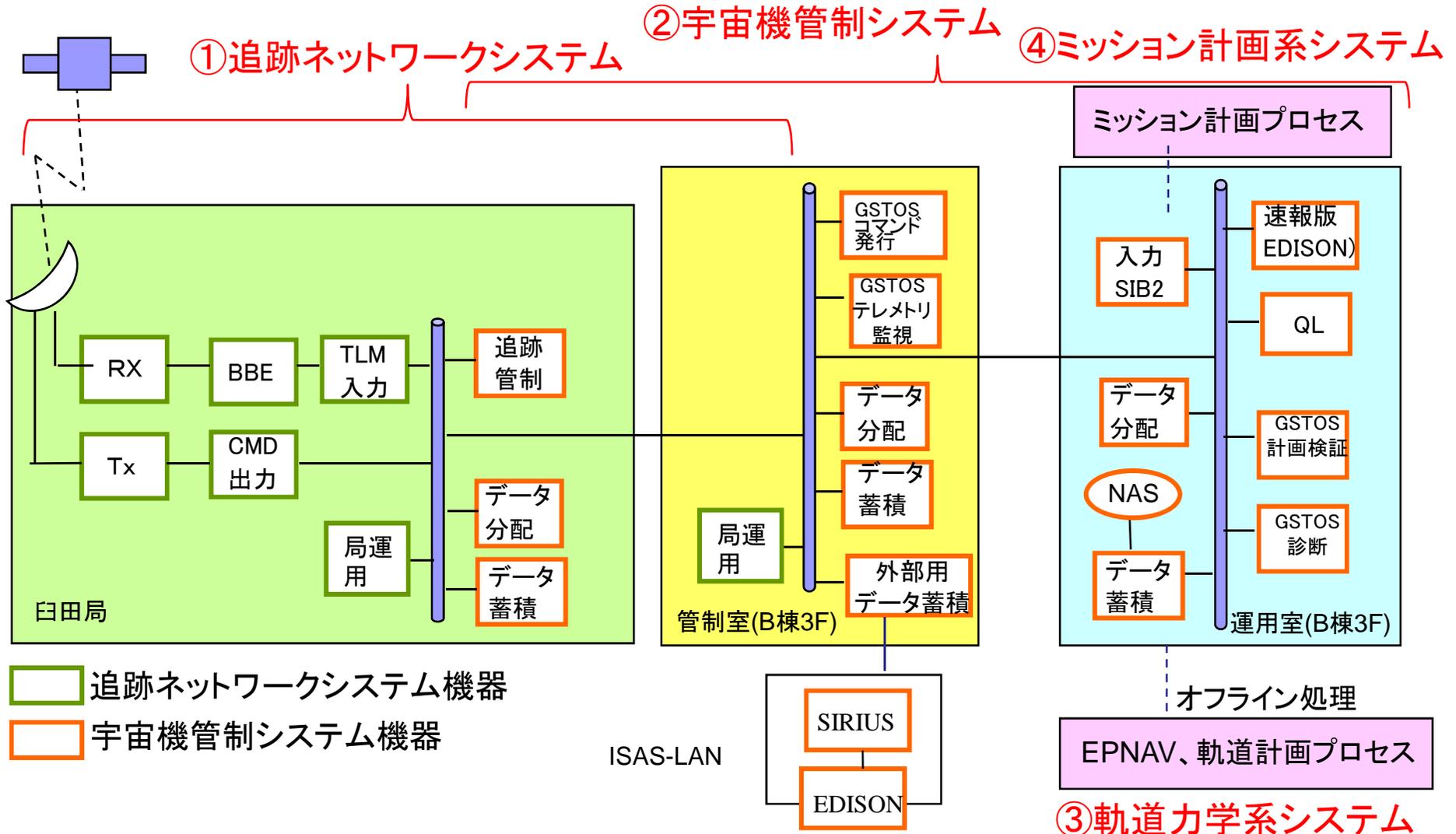
#### (6) 今後の開発計画

- EMを製作して熱真空試験で分光計全体の冷却性能を確認、低温動作試験及び振動試験で組上げた状態でのシャッターの耐環境性を確認する。

# 4. システム選定と基本設計要求

## 4.10地上系(1/2)

基本的に相模原の共通管制系を活用する。



③軌道力学系システム

## 4. システム選定と基本設計要求

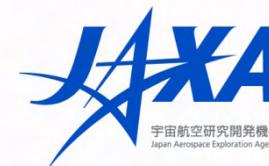
### 4.10地上系(2/2)



- はやぶさ2向けの探査機管制・ミッション運用システムの中核部分は、科学衛星運用・データ利用センター(C-SODA)が開発・整備を行っている将来の科学衛星に標準的な構成・仕様を採用する。
- C-SODAの管制システムの開発状況に歩調を合わせ、汎用衛星試験運用ソフトウェアおよび衛星情報ベース2を採用する。
- 上記の中核部分に「はやぶさ2」固有のシステムを「はやぶさ」の資産を有効活用しながら追加することで効率的なシステム構築を目指す。

## 4. システム選定と基本設計要求

### 4. 10地上系(推進部会助言に対する回答)



#### 推進部会の助言

地上系については「はやぶさ」からの変更箇所を最小限にするとのある。設備の一部再利用などもあると思われるが、実利用が5年後以降なので、老朽化・電子部品の性能向上などを十分考慮して準備を進めること。

#### 回答:

汎用的なソフトウェア・ハードウェアについては、全科学衛星の共通基盤として整備・更新されているものを使用するため、実利用の時点での最新のものを使用します。

なお、「はやぶさ2」固有のソフトウェアの多くは、「はやぶさ」のものが再利用可能です。

---

## 5. 開発計画

## 5. 開発計画

### 5.1 スケジュール(打上まで)

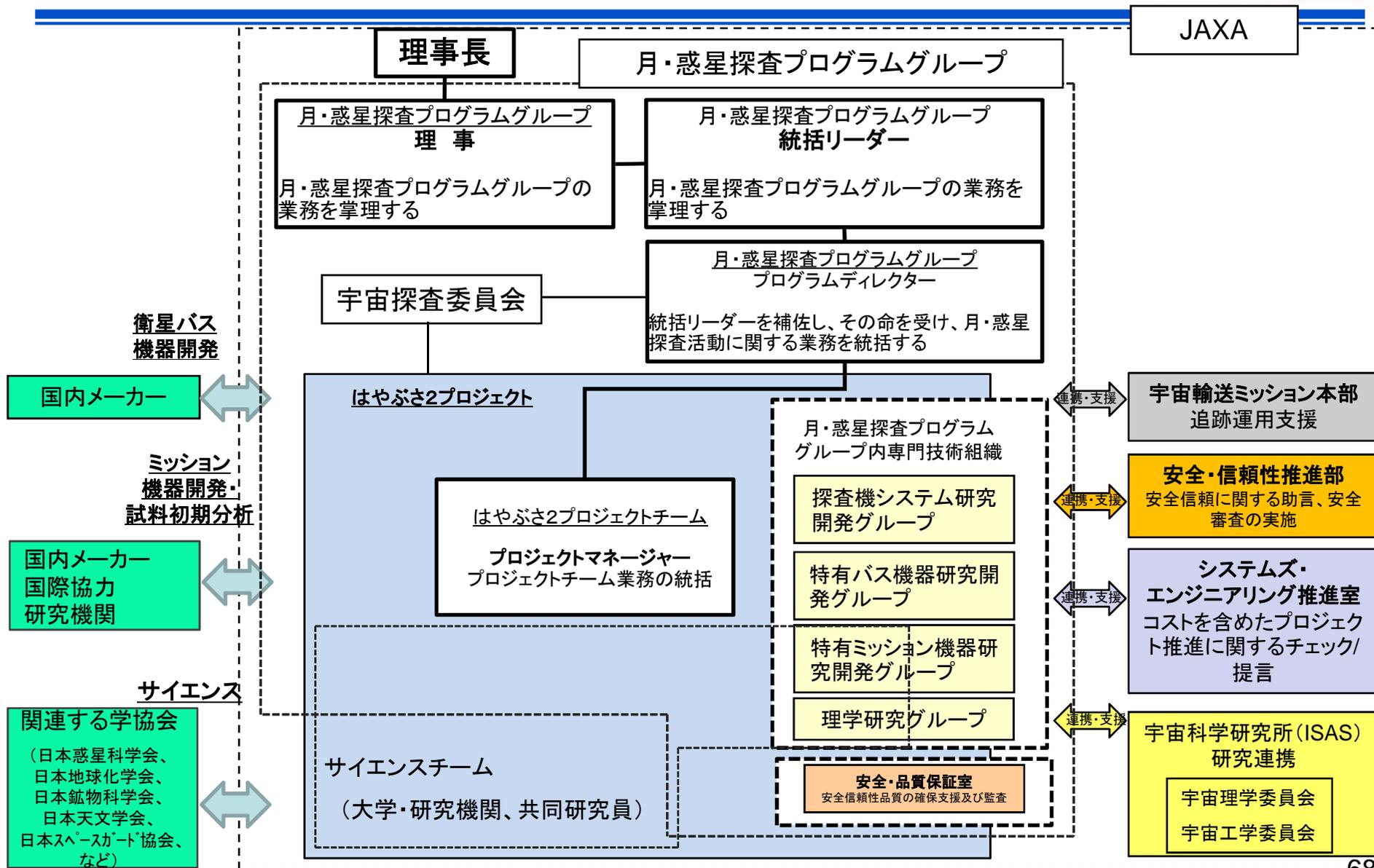
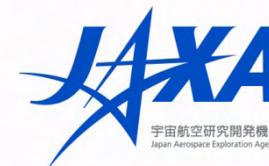
はやぶさの技術を最大限に活用し、変更を抑えることで開発期間の短縮を図っている。

2011(H23) 年度半ばよりFM製作に着手し、2012 (H24)年度半ばに一次噛合試験を開始する。

年度	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26
	FY2010	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014
主要イベント	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その1)</li> <li>▲新機器RFP</li> <li>▲システム設計審査会(SDR)</li> <li>▲プロジェクト移行審査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その2)</li> <li>▲基本設計審査会(PDR)</li> <li>▲詳細設計審査会(CDR)</li> </ul>		▲納入	▲打上
開発フェーズ	設計	製作	組み立て・試験	射場・打上準備	

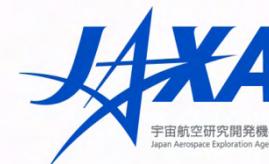
# 5. 開発計画

## 5.2 実施体制(組織体制)

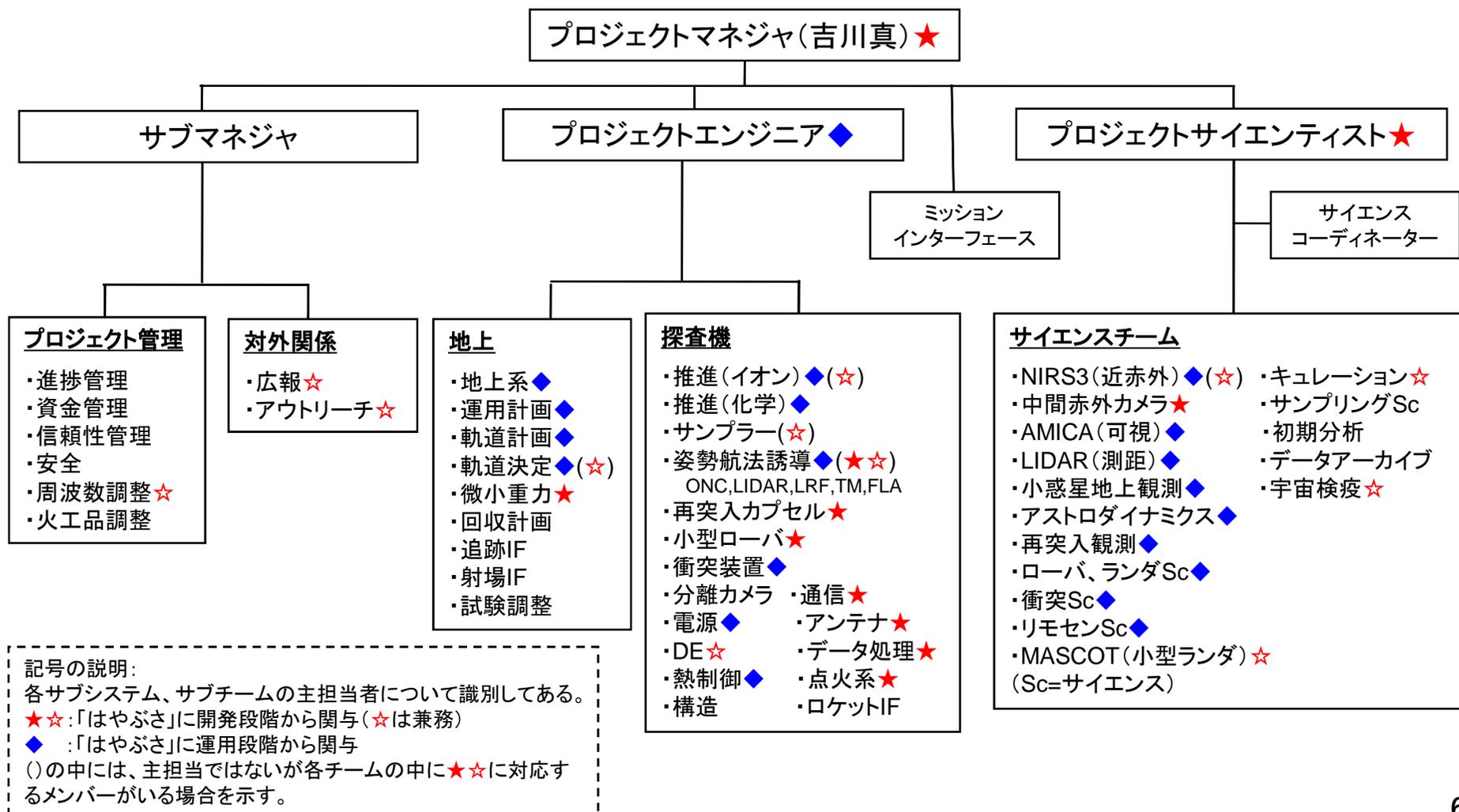


# 5. 開発計画

## 5.2 実施体制(人員体制)

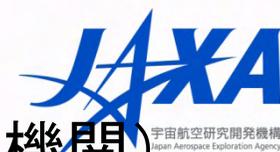


下の図は、はやぶさ2プロジェクトの実施体制を示す。「はやぶさ」の経験者を各サブシステムやサブチームのリーダーとして多く取り込みつつ、新しいメンバーを加えた体制としている。なお、はやぶさ2のミッションにはJAXA外メンバーとして本文70ページに示した国内外の大学、研究所等が参加している。



# 5. 開発計画

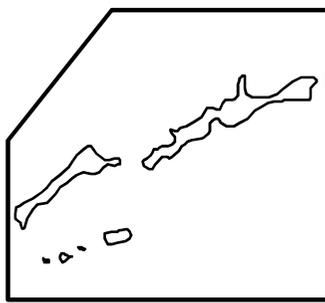
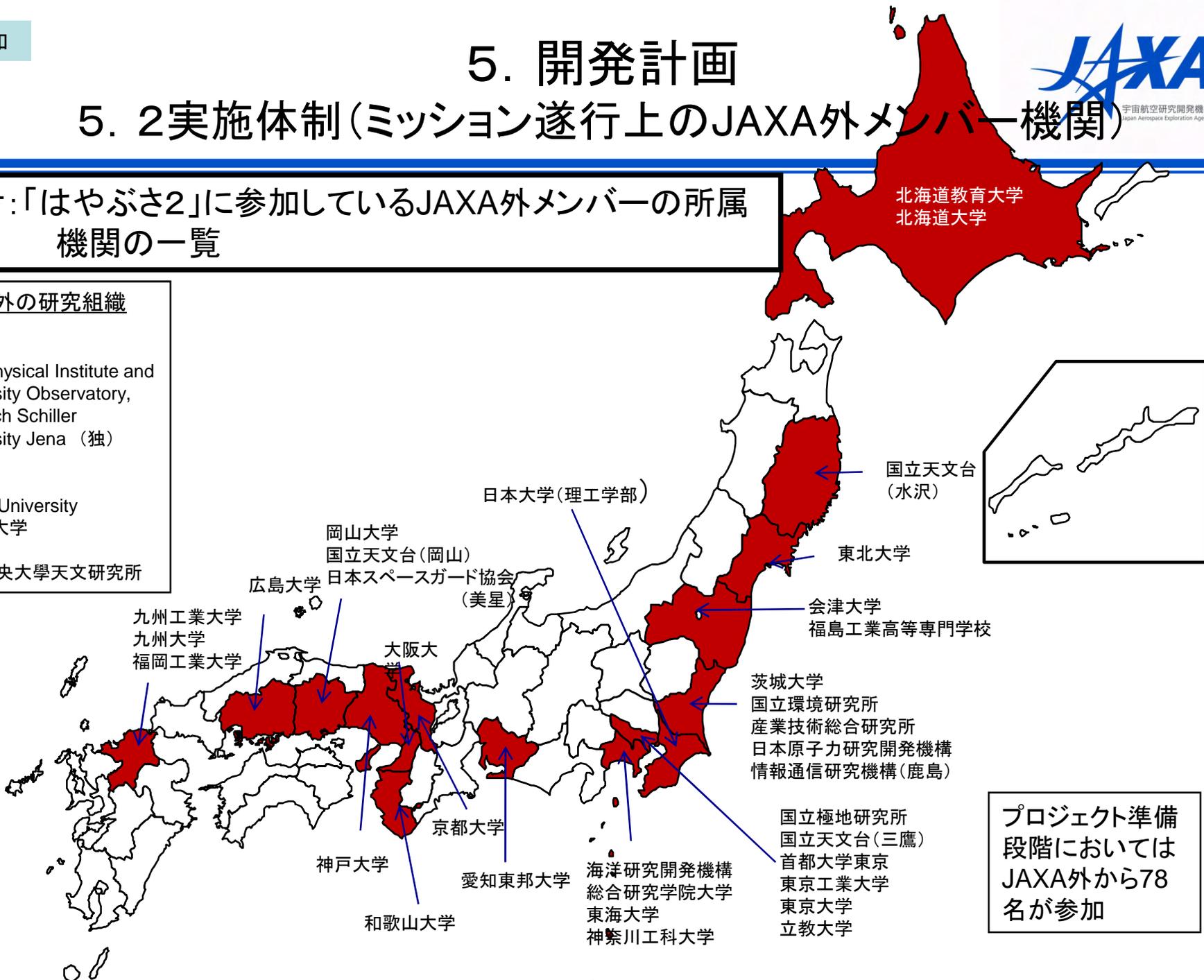
## 5. 2実施体制(ミッション遂行上のJAXA外メンバー機関)



参考:「はやぶさ2」に参加しているJAXA外メンバーの所属機関の一覧

### 海外の研究組織

- (ドイツ)  
DLR  
Astrophysical Institute and  
University Observatory,  
Friedrich Schiller  
University Jena (独)
- (USA)  
NASA  
Brown University  
ハワイ大学
- (台湾)  
国立中央大學天文研究所



プロジェクト準備段階においてはJAXA外から78名が参加

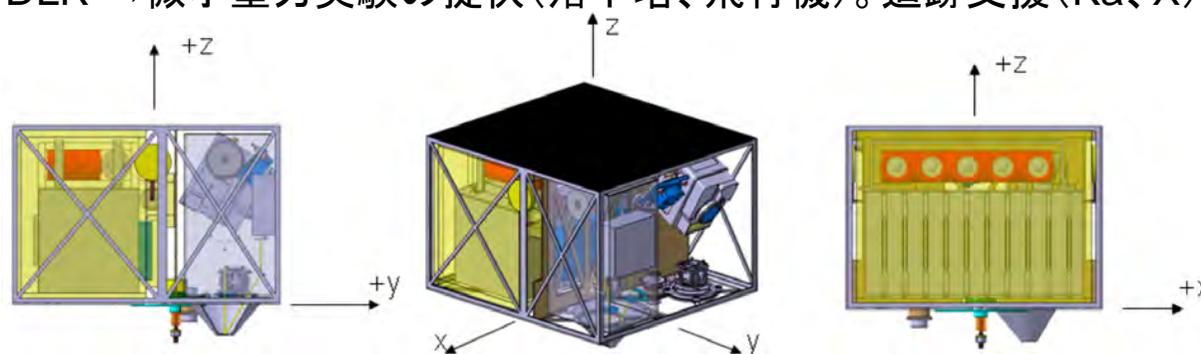
## 5. 開発計画

### 5.2 実施体制(海外協力)

「はやぶさ2」においては、DLR(ドイツ航空宇宙センター)、NASA(アメリカ航空宇宙局)、オーストラリア政府(SLASO)との協力予定である。DLRとNASAとは協議を進めているところで、現時点で検討されている協力内容は以下ようになる。

#### ■DLRとの協力

- ・JAXA→DLRが開発した小型ランダ(MASCOT)を搭載。  
MASCOT:総質量は10kg以下。搭載が検討されているミッション機器は4種類。
- ・DLR →微小重力実験の提供(落下塔、飛行機)。追跡支援(Ka、X)。



DLRが検討中の小型ランダ:MASCOT

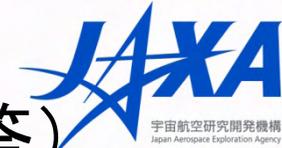
MASCOT搭載予定機器

機器名称	機能
MicroOmega	分光顕微鏡
CAM	広角カメラ 4色LED付き
MARA	熱放射計
MAG	磁力計

#### ■NASAとの協力

- ・「はやぶさ」と同様な協力関係
- ・JAXA→観測データやサンプルの提供。有人ミッション検討に関連するデータの提供。
- ・NASA→追跡、軌道決定支援。宇宙検疫のサポート。ヒートシールド試験支援。地上観測。

## 5. 開発計画



### 5. 2実施体制(推進部会助言に対する回答)

#### 推進部会の助言

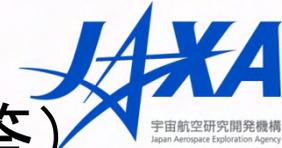
今回のミッションは月・惑星探査プログラムグループの下でのものではあるが、宇宙科学研究所の進め方とは異なるとはいえ、今回のような理学、工学の両方で目標を掲げるならば、小惑星探査に強い情熱を持つ小惑星・太陽系科学者、深宇宙探査の工学的専門家がそれぞれリーダーとして見えるような体制を早急に構築すること。

#### 回答:

下記のように「はやぶさ2」プロジェクトの体制を構築した。

- ・各サブシステム、サブチームの主担当者には、可能な限り「はやぶさ」の経験者を配置した。
- ・世代交代も意識して若手を主担当に起用している場合もあるが、そのような場合には、チームメンバーとして「はやぶさ」開発経験者を配置した。
- ・月惑星探査プログラムグループ(JSPEC)だけでなく、宇宙科学研究所(ISAS)やその他のJAXA部署からもメンバーが加わった体制となっている。
- ・「はやぶさ2」では、サイエンスが大きな比重を占めるため、検討段階からJAXA外の研究者にも多く加わってもらい、「はやぶさ2」のサイエンスチームとなっている。

## 5. 開発計画



### 5. 2実施体制(推進部会助言に対する回答)

#### 推進部会の助言

JAXA内外で多数の分散化されたチームや研究者が関わっており、はやぶさ2の2014年の確実な打上げを目指し、プロジェクトを効率的に管理すること。

回答：従来の科学衛星と同様に、以下のようにプロジェクトを進めることとしている。

- ミッション機器のチームには、必ずJAXAのメンバーが加わり、情報の展開/収集や議論をリアルタイムに行う。
- およそ2ヶ月に一度、関係者(\*)が一堂に会して設計会議を開催する。(すでに3回開催)。

\*バスおよびミッション機器、探査機システム、地上系システムの関係者、研究者および各メーカー担当者の全てが集まる。

## 5. 開発計画

### 5.3 開発資金

はやぶさ2プロジェクトの資金計画は、以下を目標とする。

項目	コスト(億円)	備考
衛星開発費	約 159 (*1)	
地上設備開発	約 10 (*2)	キュレーション設備、地上設備分含む
運用費	約 25 (*2)	運用費(帰還運用含む)、初期分析(設備含む)、アウトリーチ活動含む

補足説明

\*1: 開発研究移行事前評価(平成22年8月)から、+11億円。

はやぶさ Lessons Learnedの反映(サンプル内面鏡面研磨等)、SAC事前評価(その1)での助言反映(LRF追加、ヒータ制御装置追加等)によりコスト増となった。

\*2: 開発研究移行事前評価(平成22年8月)から +4億円(STEのみ)と項目の再整理。

衛星試験装置(STE)整備費追加(相模原地上系設備の老朽化による整備)、地球への帰還運用・初期分析(設備整備含む)、アウトリーチ活動経費を新たに運用費に含め、追跡管制ソフトウェア開発分を運用費から地上設備に含めると整理したため。

参考: 過去・現在の類似探査機開発費(打上費用除く)

- はやぶさ (日本、小惑星サンプルリターン、運用2003-2010年):  
約127億円(運用費は含まない)
- スターダスト (米国、彗星塵サンプルリターン、運用1999-2006年):  
約1.5億米ドル(180億円: 1999年支出官レート)
- オシリス・レックス(米国、小惑星サンプルリターン、フェーズA検討中):  
8億米ドル以下(712億円: 2011年支出官レート)

## 5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)

本プロジェクトに限らず、開発資金の妥当性に関して、より明確にするための方途につき検討すること。

回答:

はやぶさ2としては、開発資金について、以下の事項に整理した。

- ① 衛星開発費
- ② 地上設備開発費 (キュレーション設備、地上設備分含む)
- ③ 運用費 (運用費、初期分析、アウトリーチ活動含む)

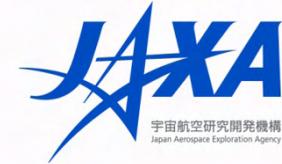
また、2011(H23)年3月に実施したJAXA内審査会では、コスト評価として、

- a. 開発方針と開発方針に応じたコスト推定内訳及び推定に至る考え方・根拠
- b. 算定プロセス・状況
- c. リスクへの対応策

などに関してははやぶさとの比較等により開発資金の妥当性について審査を行った。

はやぶさからの変更箇所を最小限にすることによる低コスト化・開発期間の短縮、他プロジェクトで実績のあるコンポーネントの使用による開発試験の一部省略などのコスト削減を図りつつ、はやぶさ Lessons Learnedの反映による信頼性向上や、各リスクへの対応策を施す状況を踏まえ、開発資金は概ね妥当と判断した。

## 5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



### 推進部会の助言

探査機が採取した試料の分析に関し、「初期分析を1年間行った後、全世界の研究者に公開して詳細分析を行う」とされているが、真空保管や高純度窒素ガス雰囲気での作業を計画しているものの、大気中の酸素や水により試料の状態が時間とともに大きく変化する可能性があり、短寿命放射性元素に関しても時間の影響が大きいので、最大の「科学的成果」を挙げるためには、初期分析の優先順位の検討や、1年後ではなく初期段階から世界の専門家の英知を結集して分析する等、事前に十分検討すること。

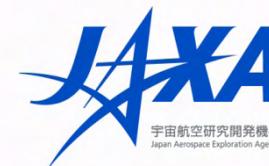
### 回答:

地上回収後速やかに、かつ、地上での汚染がない状態で試料分析を始められるようサンプルコンテナの改良を進めており、時間とともに大きく変化しないよう対処します。

その上で、以下のように行うことで、最大の科学的成果を挙げる計画です。

- ・初期分析の項目は、サンプルの状態を考慮した優先度の検討を進めている。
- ・分析チームでは、手法及びテーマごとにサイエンスの多角的検討を行っている。
  - 1) 鉱物・組織分析、同位体分析、有機物分析、希ガス分析
  - 2) 銀河・分子雲、原始太陽系円盤、微惑星、宇宙風化
- ・日本の惑星物質分析のレベルは世界最高水準にあるため、それぞれのチームのリーダーは日本人研究者が務めること検討している。但し、短期間の初期分析で最大の成果をあげるために、日本でおこなうことが難しいような分析項目などを中心に海外の研究者の協力を得たいと考えている。

## 5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



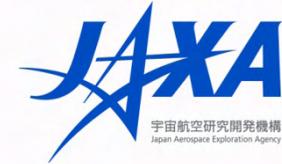
### 推進部会の助言

今後の分析技術の進捗を反映して、超一流の分析の実施を目指し、更なる分析体制の充実と強化を図ること。

回答： 今後の分析技術の進捗を見据えることはリターンサンプルで最大の科学成果を得るために重要である。初期分析以降のさらなる分析体制の充実と強化は、はやぶさ2プロジェクトではなく、「はやぶさ」の経験・実績を通して活発化した分析科学コミュニティが主体となって実施される。

分析科学コミュニティでは、進捗を見据えるだけでなく、分析技術を開発・進展させることも始めており、次世代二次イオン質量分析計の開発や、J-PARCと連携し、ミュオンを用いた非破壊での軽元素バルク分析の試験をおこなっている。また、有機物分析が重要となるため、放射光施設での顕微軟X線吸光分析、微小領域での有機物質質量分析・光学活性分析といった手法の開発の検討を進めている。次世代の国内分析チームの更なる強化を目的とし、シニア研究者をとりまとめとした中堅・若手によるコンソーシアム研究も開始している。

## 5. 開発計画 (推進部会助言に対する回答)



将来の深宇宙探査に向けての各種搭載機器・センサー類等についても、長期的視点で開発に取り組むこと。

回答:

センサー(サイエンス機器)は、C型小惑星探査に特化せざるを得ないが、バス系機器については、さらなる深宇宙探査においても流用できる構成としている。また、さらなる深宇宙探査においても通信データ量を確保すべく、今回Ka帯通信系も搭載することとした。新規搭載機器である衝突装置は将来、地下探査をおこなう有効な手法であると考えている。

---

## 6. リスク管理

# 6. リスク管理

## 6.1 リスク管理方針・実施計画

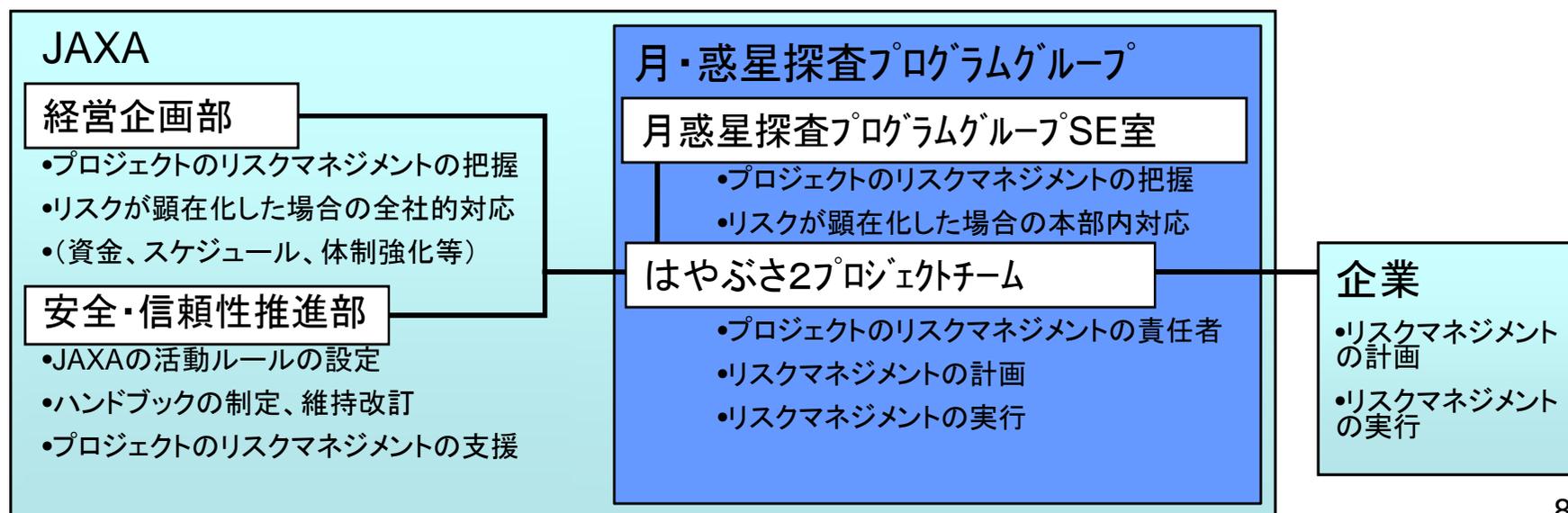
### (1) リスク管理方針

はやぶさ2開発のリスクについては、探査機の開発に係わるリスクを許容できる範囲に低減し、探査機開発を確実に実行するために、リスク管理は、他の科学衛星に準じて「科学衛星リスクマネジメント標準」に基づいて管理を行う。

### (2) リスク管理の実実施計画

#### ➤ リスク管理体制構築

プロジェクト内外の役割と責任を決定し、リスク管理を実行する体制を構築する。

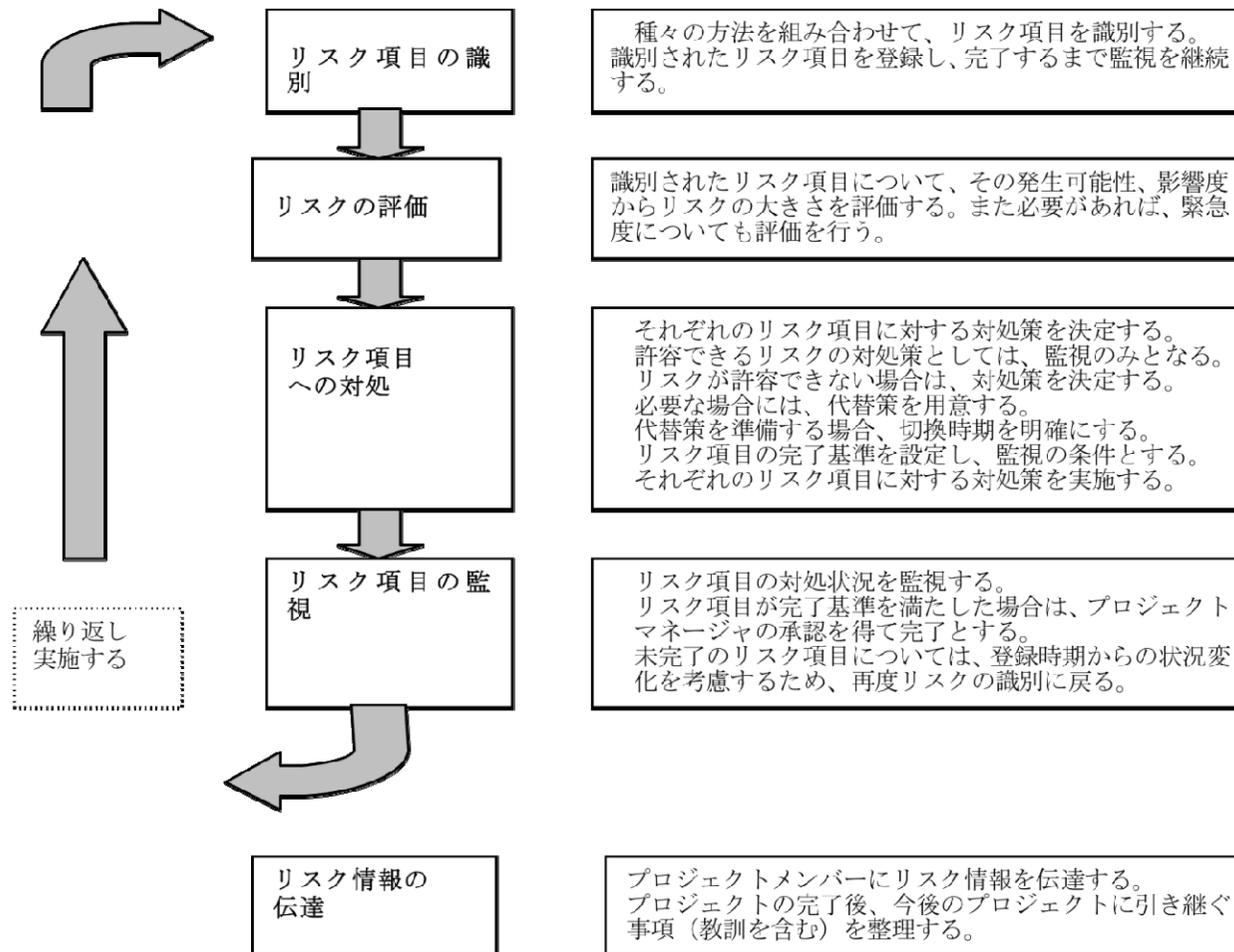


# 6. リスク管理

## 6. 2 リスク管理の考え方

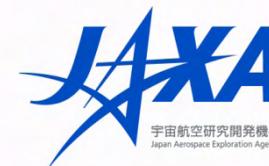
### ➤ リスク管理の実行

プロジェクトの開始から終了まで、継続的に以下のリスク管理を実行し。開発へのフィードバックを図る。



# 6. リスク管理

## 6. 3 リスク識別と対処方針

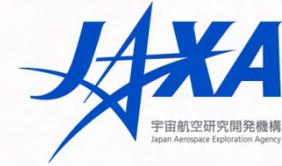


### (3) リスク管理状況(プロジェクト全体レベル)

はやぶさ2プロジェクトリスク識別結果のうち、プロジェクト全体レベルに関する主要なリスクの対処計画を以下に示す。

リスク項目	プロジェクト	対処計画
H-IIAロケット打上げの遅延	ロケット	JAXA内関係部署との調整を密にし、2014(H26)年打ち上げ機会を確実に確保する。また、開発の遅延や、ロケット側の遅延に対して、2015(H27)年のロンチウインド確認と打上げロケットの調整を進める。
探査機開発の遅延	探査機	開発作業項目をブレークダウンし、衛星開発の全フェーズでクリティカルパスを明確化するとともに、マスタスケジュール等でスケジュールの進捗管理を徹底して、スケジュール遅延を未然に防ぐ。
DSN局の支援確保	探査機	海外局が確保できないと運用に大きな支障がでるため、JAXA内外関係部署との調整を密にして支援確保を図る。
衝突装置の開発	探査機	早期に設計を行い、EMまたはBBM等の開発を実施する。探査機姿勢系と合わせた設計検討と地上検証を行う。安全設計に関しても早期に着手を行い、設計検討と地上検証を行う。
近赤外分光計の開発	探査機	早期に設計を行い、EMまたはBBMの開発を実施する。探査機姿勢系と合わせた設計検討と地上検証を行う。
外部的要因による計画遅延	全体	予算等の外部的要因による開発計画のシフト、打上げ年度のシフトに対しては、2015(H27)年のロンチウインド確認と打上げロケットの調整を進める。また、それ以上の計画遅延では打ち上げウインドウを逸してしまうため、全社的なリスクとしてJAXA内外関係部署との調整を密にして遅延を未然に防ぐ。

## 6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

(i) 探査機本体を小惑星の表面に確実に着陸させること(転倒させない)

回答:

「転倒させない」ために、探査機が小惑星表面にタッチダウンしてから上昇する間に、その姿勢をサンブラホーンが小惑星表面に対し垂直となるように維持します。はやぶさ2が探査対象としている小惑星1999JU3表面の重力の推定値は、 $6 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$  ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )の範囲ですが、サンブラホーンの長さ、配置位置から、何らかの原因で探査機が転倒した場合、リアクションホイールのトルクだけでは姿勢を立て直すことは不可能で、スラストでの上昇 $\Delta V$ を行う事態を招いてしまいます。(「はやぶさ」の最初のタッチダウンがこのケースです)

このような事態を招くことが無いように、タッチダウンの際の探査機の世界速度制約として、

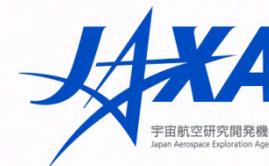
縦方向 : 0.05~0.1 (m/s)

横方向 : 0.08 (m/s) 以下

を誘導制御系の性能要求値としており、サンプル回収後、直ちに上昇することとしております。

また、タッチダウンの際にパドルなどの探査機の一部が表面に接地するような姿勢変動(例えば、7 deg)が生じた場合には、自律的に上昇するように設計しております。

## 6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

(ii) 探査ロボットによる小惑星の表面環境の探査

回答:

はやぶさ2では、ホバリング時ではなく小惑星表面接近時に探査ロボットを放出することで確実に、小惑星の表面環境の探査を行います。なお、放出シーケンスは、はやぶさのターゲットマーカ放出にてすでに実績が得られています。

## 6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)

以下の3つの点が今回の大きなchallengeであると思われるが、この点についての対応策、改善策が未だ具体的でないように思われるので、具体的な改善策を「開発」移行までにしっかりと検討すること。

(iii) 目標としている量のサンプルを採取する手法

### 回答:

はやぶさのLessons Learnedを踏まえて、確実に100mg以上のサンプル採取を実現するために、サンブラに以下の改修を実施する計画です。

- タッチダウン時の弾丸発射を確実にするために、射出コマンド発行までのソフトウェア検証、End to End試験を十分に行う、また、地上シミュレーション期間を十分に確保する。
- 採取量の増加を確実なものにするために、弾丸形状変更／角運動量付加を計画
- 採取量増加に伴い、キャッチャー内を2部屋から3部屋にし、混在させずに区別して捕獲する
- ホーン先端に折り返し部を付加し、タッチダウン時に折り返し部に捕獲された粒子をHPポジション退避中に+Z方向へ加速度をかけ、キャッチャーまで運ぶ
- キャッチャー・コンテナ内を鏡面研磨し、キュレーション作業時の分解、試料回収を容易にする

## 6. リスク管理 (推進部会助言に対する回答)



深宇宙探査では、対象となる天体との距離が大きく、制御系の動作と地上との時間差が問題となる。どこまでが地上からの制御で、どこからが衛星の自律的制御になるか、「はやぶさ」の成功、教訓を踏まえた上で、十分なリスク管理をすること。

回答:

以下に示す接近・降下フェーズでの小惑星との距離に応じた航法誘導制御方法において、搭載系による自動制御となるのは、3の高度約100m以下の部分のみで、他の部分は地上からの遠隔誘導を想定しています。ネックとなるのは搭載カメラ画像による小惑星との相対位置計測で、自動で画像計測できるのは3の投下したターゲットマーカの画像を用いるケースのみです。1、2のように相対距離が遠く、小惑星の自然地形画像を用いる必要がある距離域では、画像を地上に送って、地上オペレータがその画像から相対位置を求めるといった手段が最も信頼性が高いことが「はやぶさ」での教訓ですので、それを今回も踏襲する方針です。

1. JU3の全景が航法カメラ(ONC-W1)の視野内に収まる距離域 (ex. ~900m)
2. JU3の全景が航法カメラ(ONC-W1)の視野に収まらない距離域 (ex. 900m~100m)
3. ターゲットマーカの画像が使用できる距離域 (ex. 高度約100m以下)

ご指摘の通り、20分弱の地上との通信時間が問題となります。地上オペレータの作業時間を考慮すると、探査機での画像取得、画像計測に基づいた $\Delta V$ 指令が探査機に到着、その間に往復で60分程度の時間遅れが想定されますので、 $\Delta V$ 指令値の計算には60分後の探査機の状態(位置、速度)を地上で予測した結果を活用することで遠隔誘導の信頼性、精度の向上を図っております。

## 7. まとめ

## 7. まとめ

- － はやぶさ2のミッション要求、開発方針に基づき、「はやぶさ」探査機の技術を最大限に継承し、「はやぶさ」Lessons Learnedを反映して、はやぶさ2の開発仕様のベースラインを設定した。(4. システム選定と基本設計要求)
- － 新規技術開発を要する衝突装置、近赤外分光計においては新規要素技術、課題に対して、解析、要素試験/試作等のフロントローディングの実施により、開発の実現性を示した。(4. 9 サブシステム仕様(衝突装置)、4. 9サブシステム仕様(近赤外分光計))
- － はやぶさ2プロジェクトマネージャのもと、探査機システム／地上システム、観測機器システムの開発はそれぞれを担当するプロジェクトエンジニア、プロジェクトサイエンティストのもとで実施する体制を構築した。また、開発スケジュール、開発資金を明確にした。(5. 開発計画)
- － リスク管理方針・実施計画を定め、また、リスクの抽出とその対処方法を明らかにした。(6. リスク管理)

以上から、はやぶさ2の開発段階への移行が可能である。