

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(イジェクタのみ回避) ○ 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、着陸帰還機は回避	○ 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、

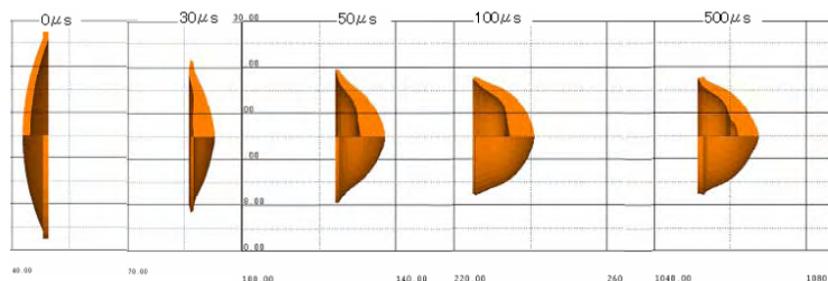
▶着陸帰還機のカメラで撮影を行った際に、その大きさ・形状を測定できる程度の大きさのクレーター(直径2m、深さ50cm程度)を形成すること。

▶サンプリングが可能な表面を新たに露出させること。

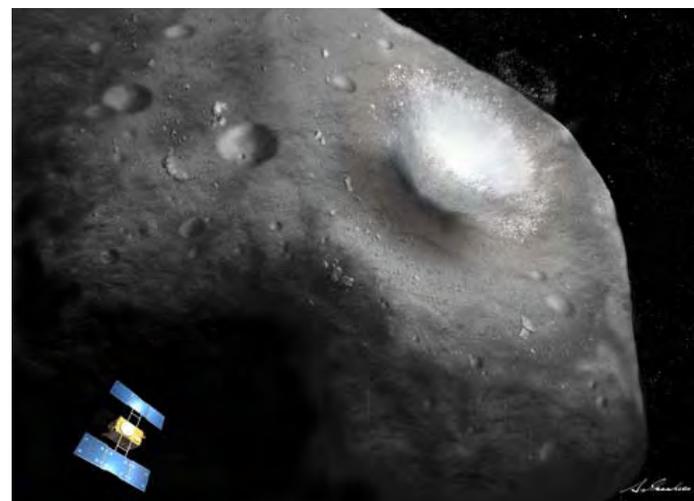
本機器は、小惑星上空(高度数100m)で分離されたのち、作動し、爆薬のエネルギーにより衝突体を高速で飛翔させ、小惑星表面に衝突させる。

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)



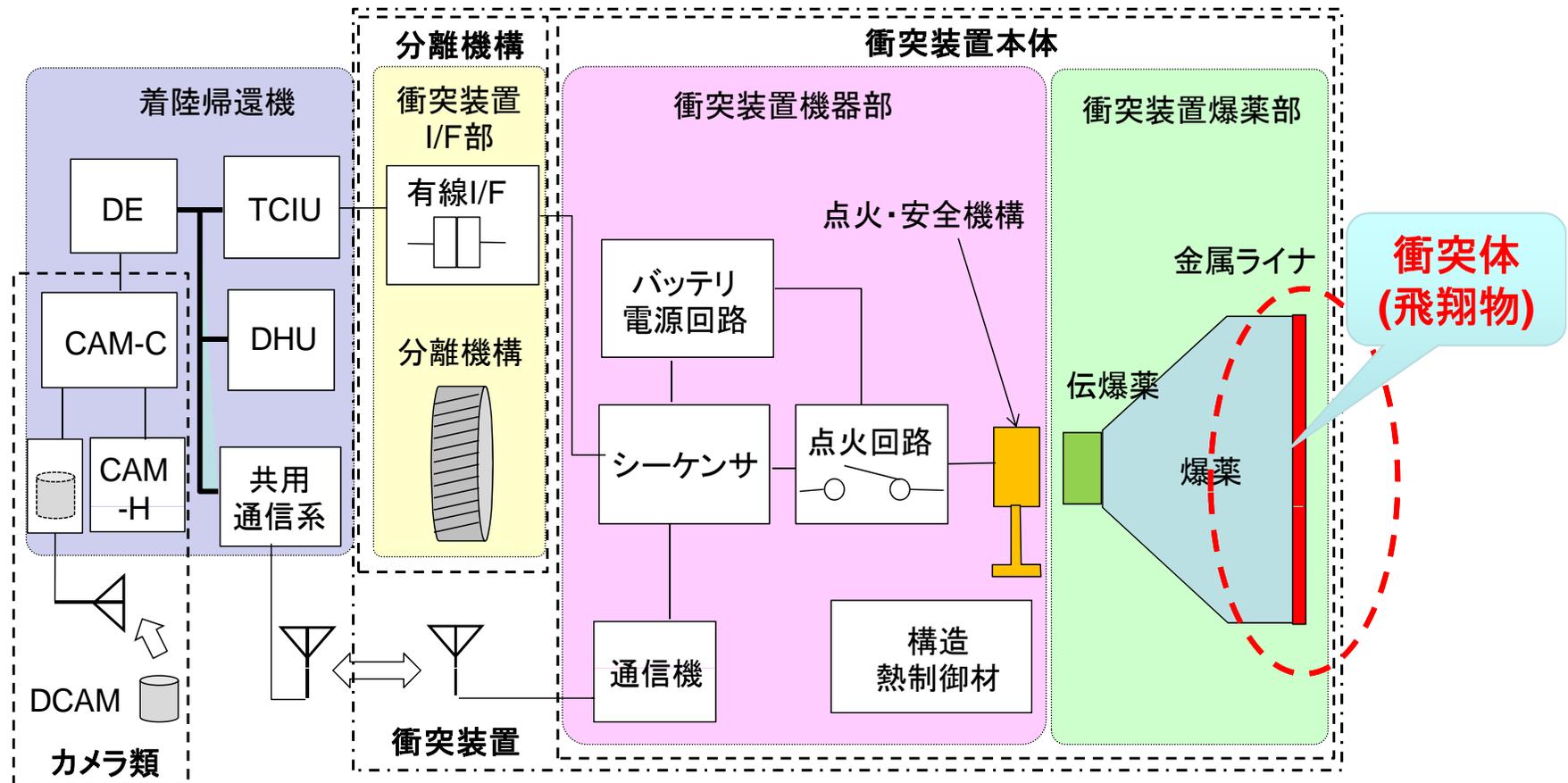
4. システム選定と基本設計要求

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(分離機構含めでの最大径は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程度で分離すること。

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: 2km程度通信できること。

A

A

4. システム選定と基本設計要求

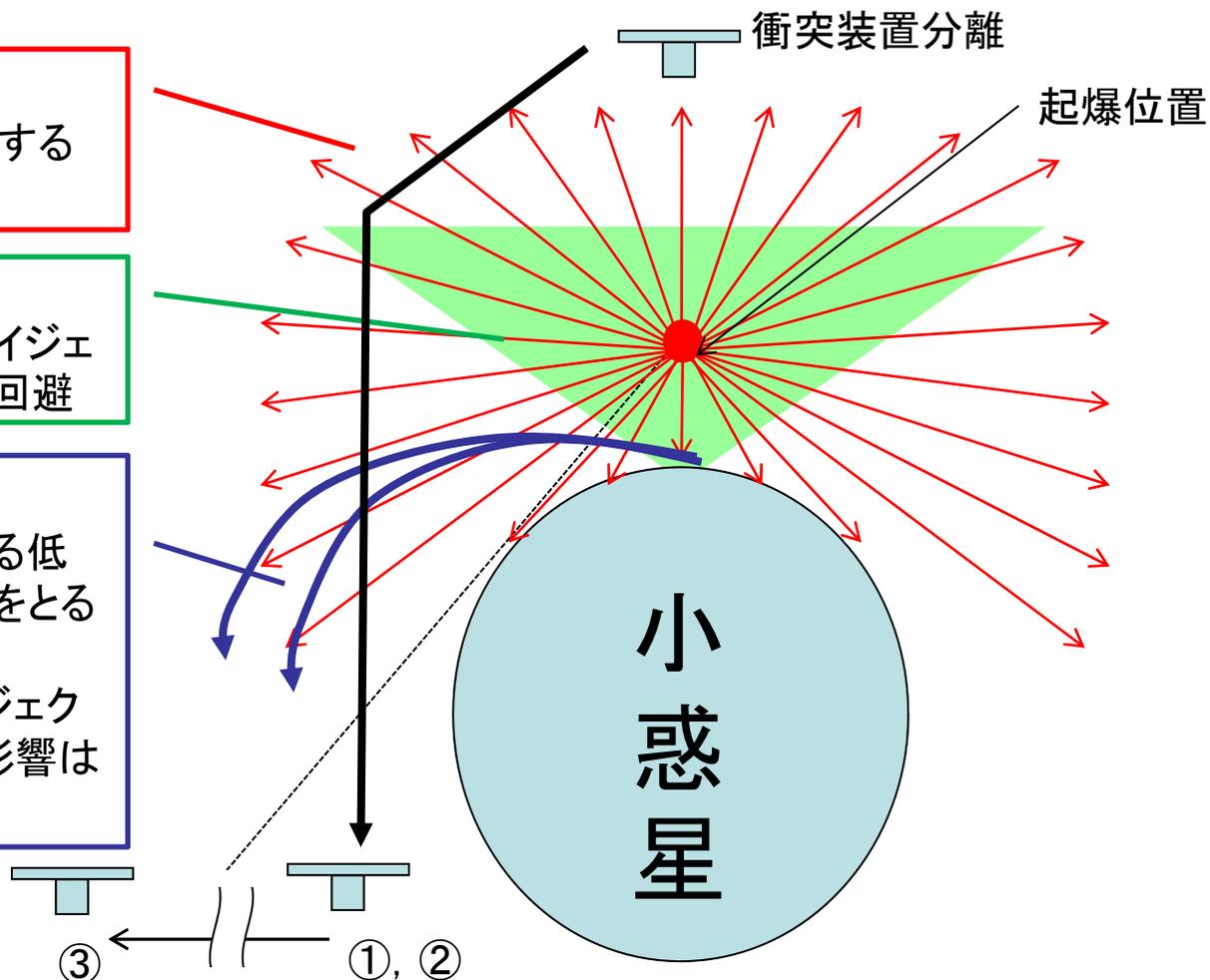
4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(5/9)

(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誤差要求

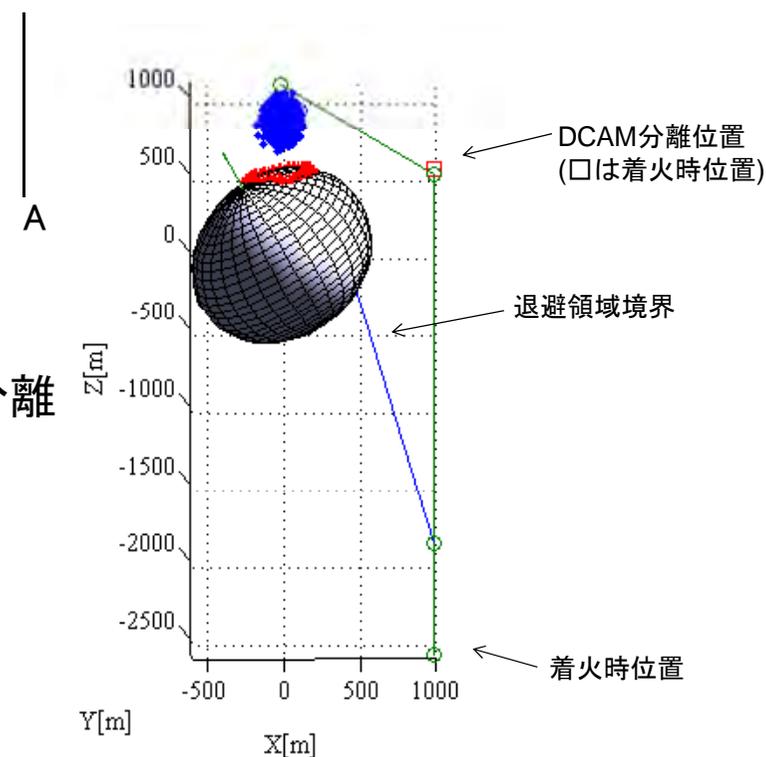
- ・ 水平速度: 0.02m/s、垂直速度: 0.03 m/s
- ・ 水平位置: 50 m、垂直位置: 30m
- ・ 姿勢: 0.5deg

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

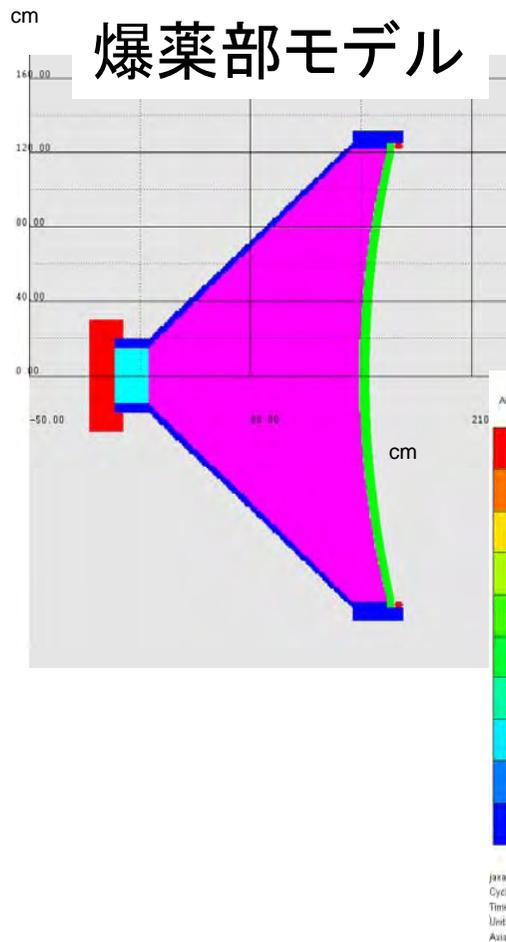


4. システム選定と基本設計要求

4.9 サブシステム仕様(衝突装置)(7/9)

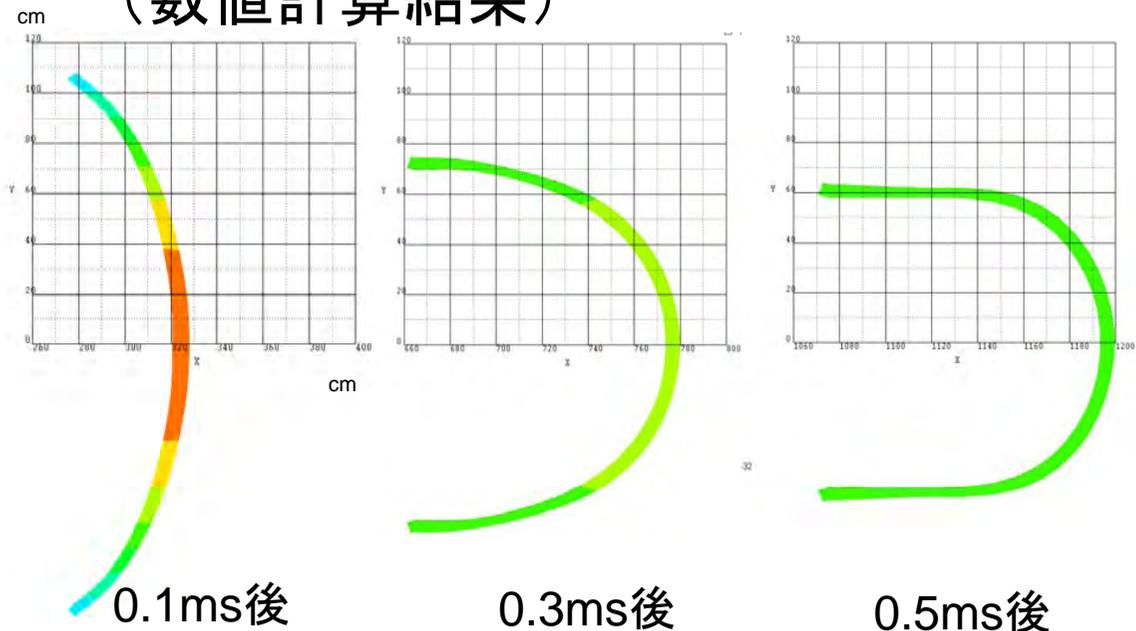
(7) 衝突装置のフロントローディング実施結果(爆薬部設計)

◆ 要求: 起爆後、衝突体が分裂することなく、速度2km/s程度で飛翔可能



- 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で飛翔することを確認。

起爆後の衝突体形状 & 速度コンター (数値計算結果)

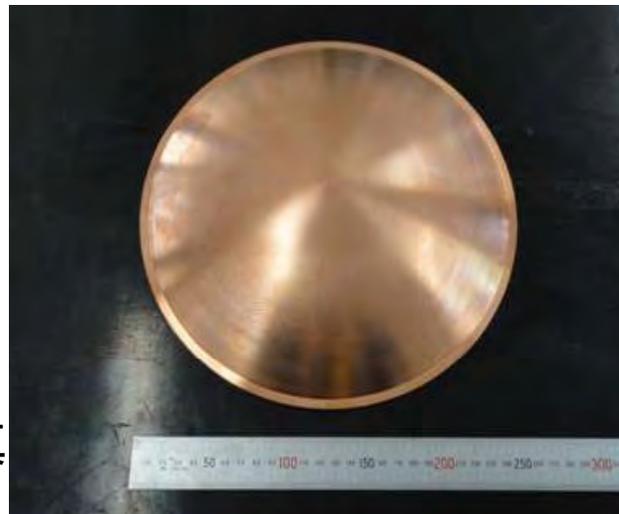
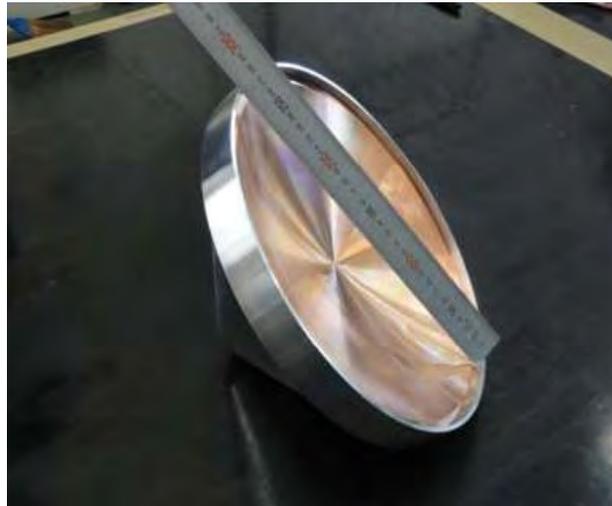


4. システム選定と基本設計要求

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)

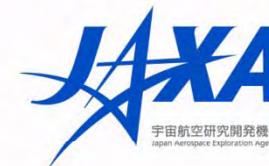
▶ 1/2スケールモデル、
1/1スケールモデルでの
試作により、材料物性
データの取得、加工性
能の検証等を実施し、
製造性を確認した。



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)

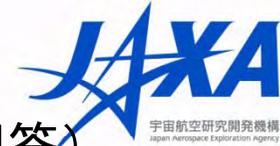


(8) 今後の開発計画

- 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、EM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。

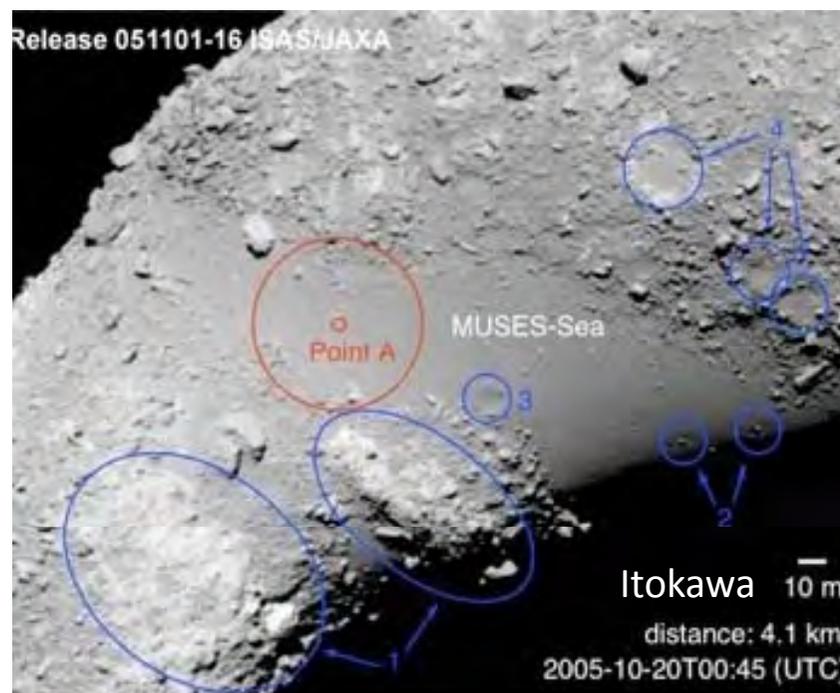
回答: 次ページ以降(53-55頁)に示す。

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す、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、ミュージズの海(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ジズの海と呼ばれる砂礫が存在する領域です。

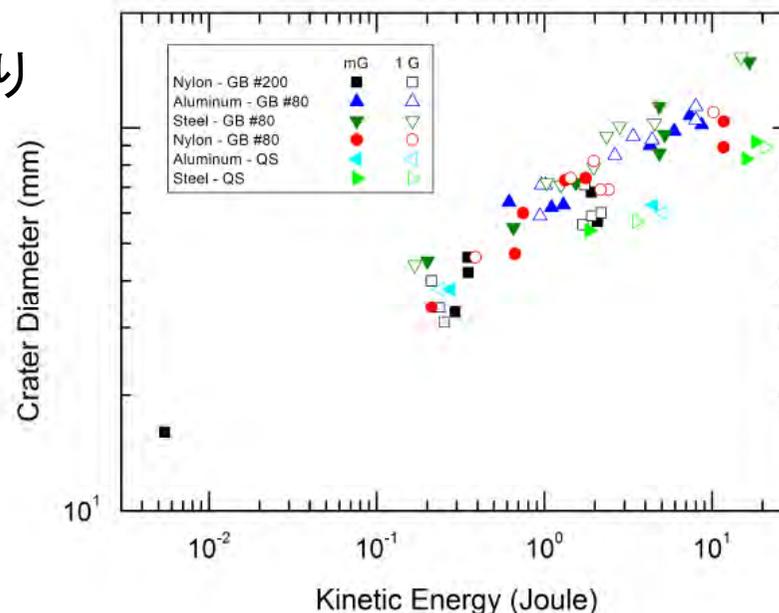
4. システム選定と基本設計要求

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。

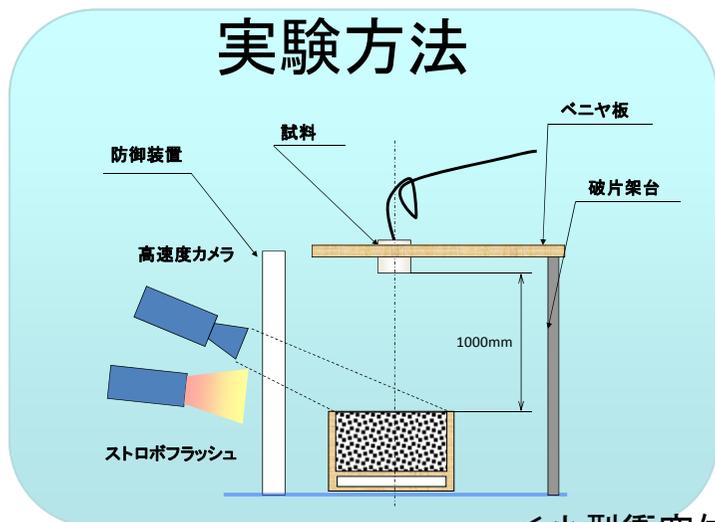
4. システム選定と基本設計要求

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。

実験方法



<小型衝突体>



ライナ

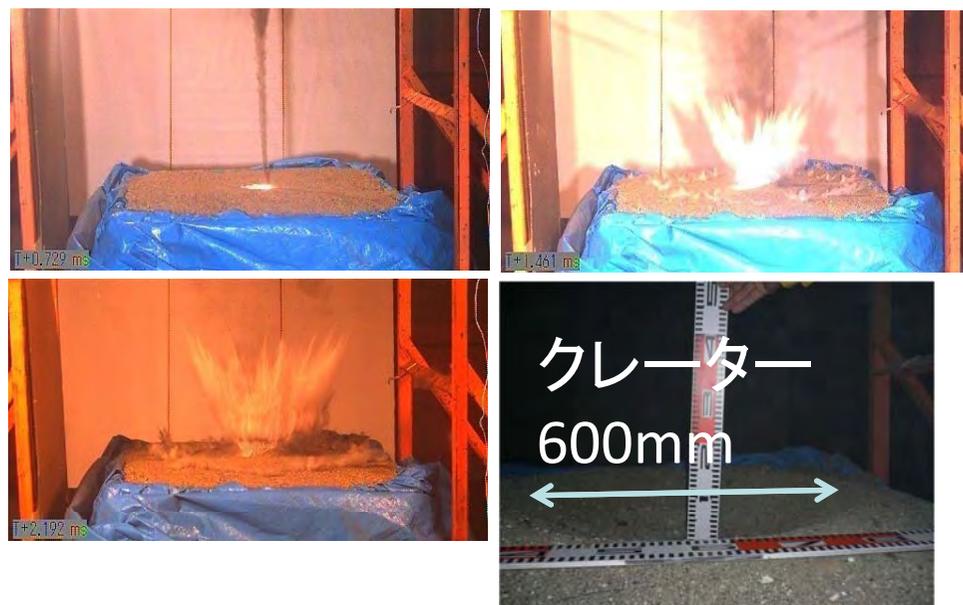
ライナ(銅)

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。

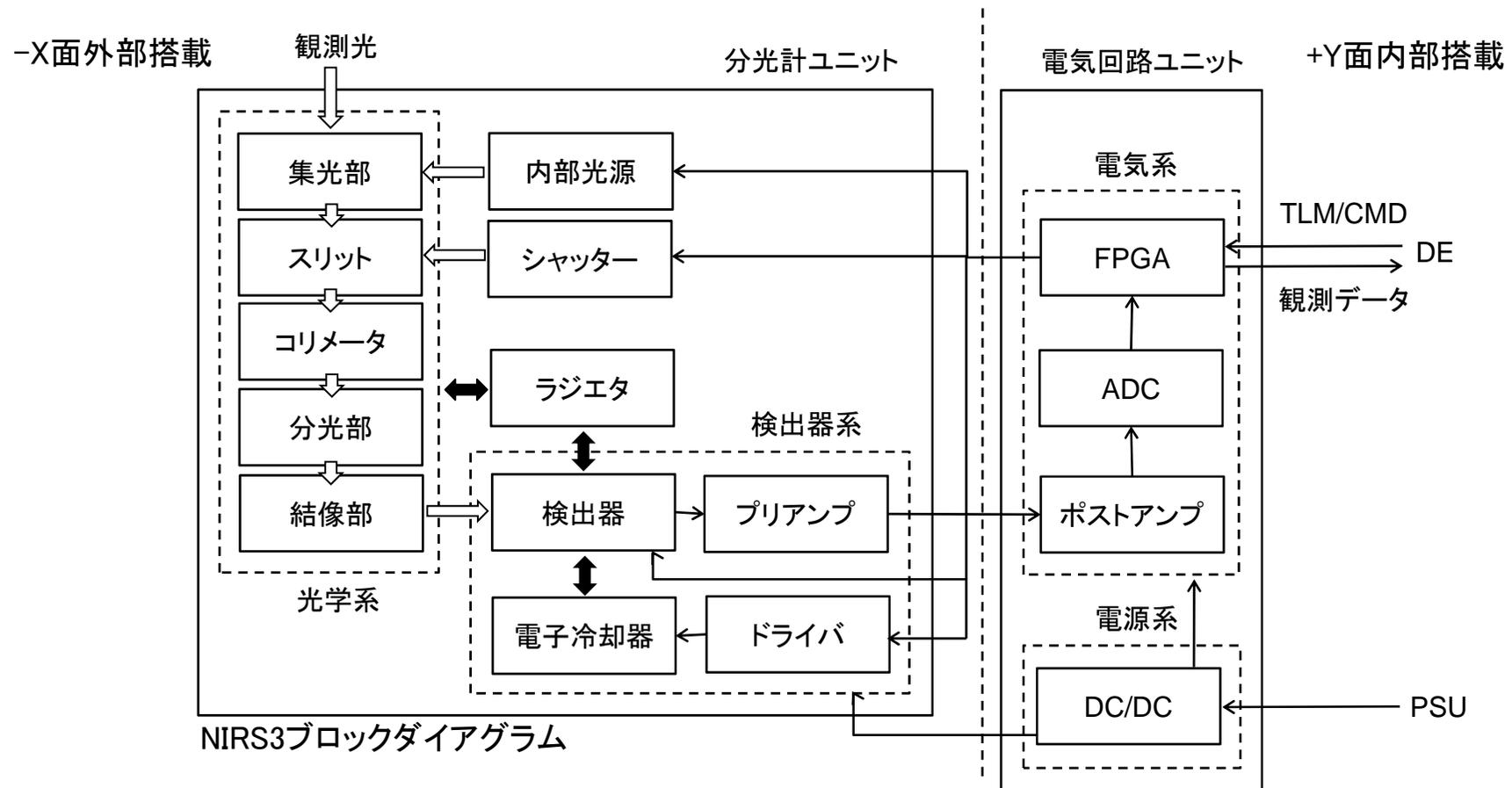
◆ 開発方針としては、短期開発の必要性からはやぶさに搭載した近赤外分光計(NIRS)の基本設計を踏襲し、3ミクロン帯の観測に必要な設計変更のみ施すことを前提とする。

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)

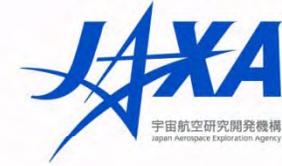
(2) 構成

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 μ m
	波長分散	20nm
	視野全角	0.1°
	集光系開口	Φ 30mm
	総合F値	F1.0
	効率	50%
	結像性能	RMSスポット径 13 μ 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 μ m
	画素高さ	100 μ 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。

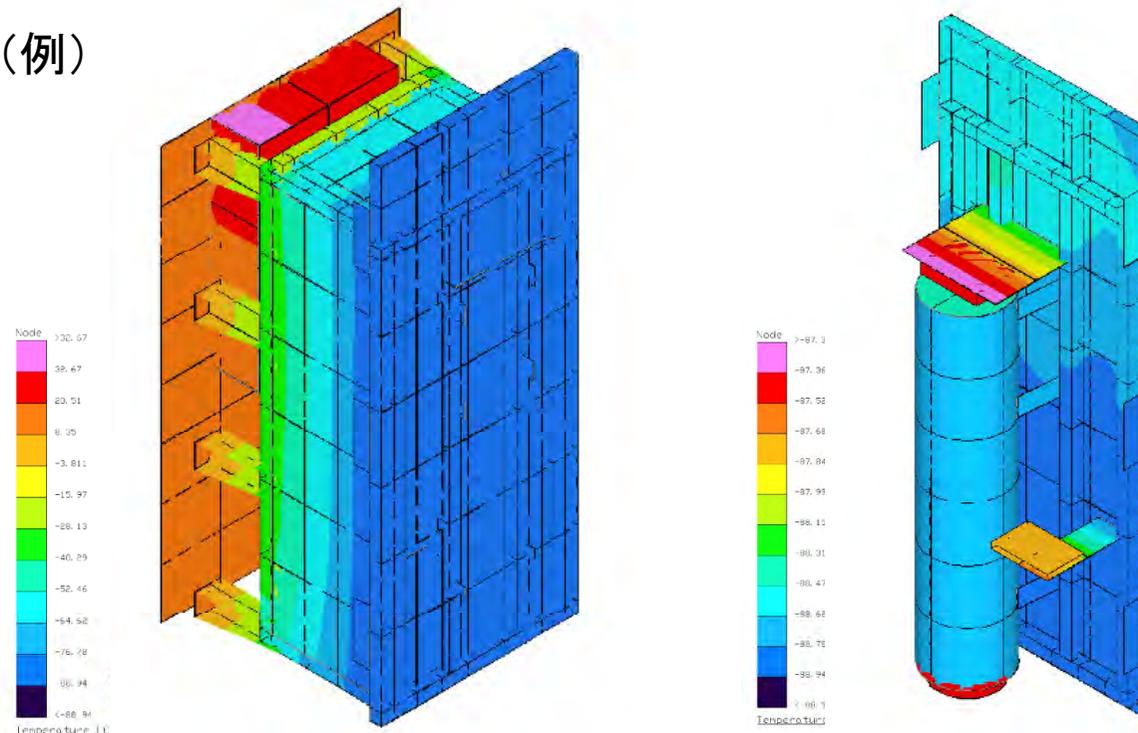
4. システム選定と基本設計要求

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

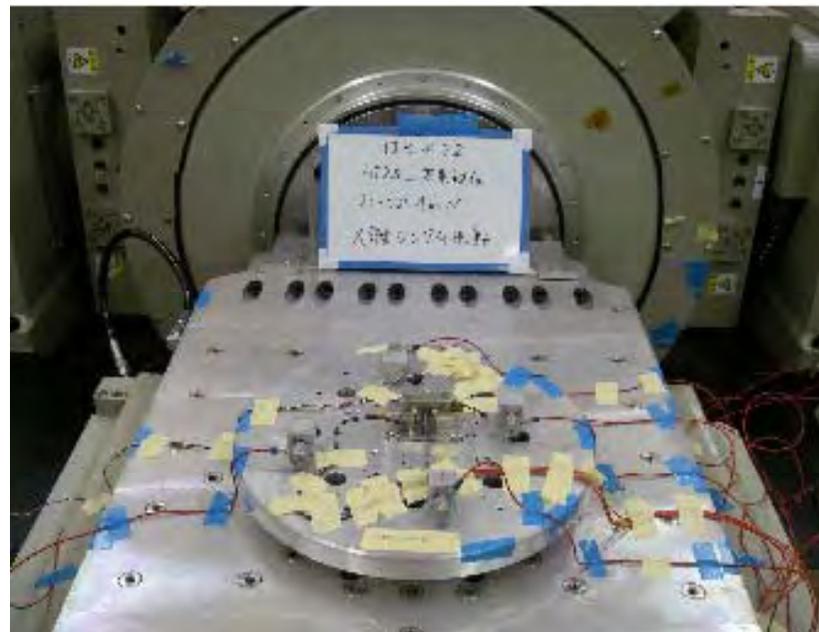
4.9サブシステム仕様(近赤外分光計)(6/7)

(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)



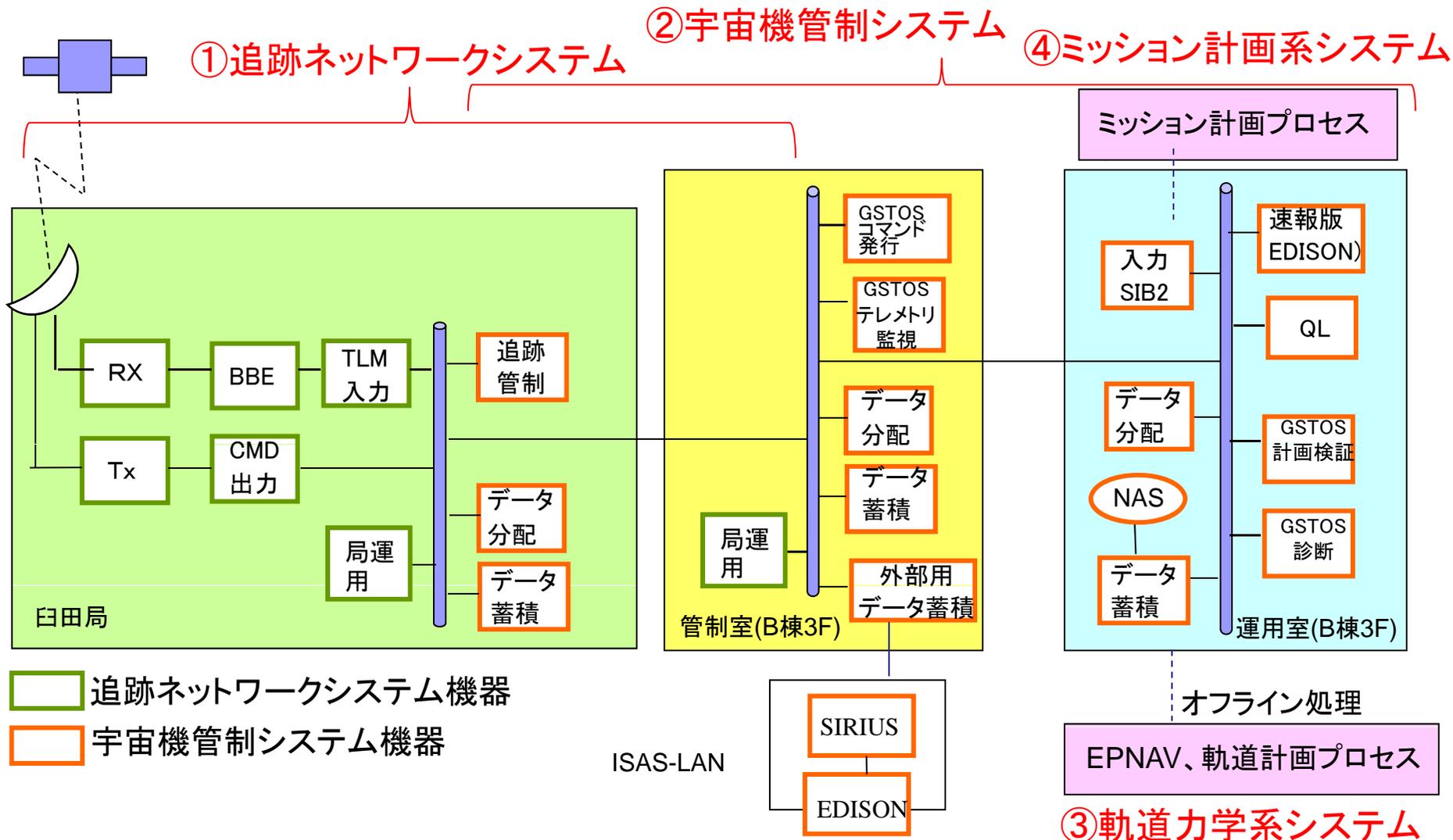
(6) 今後の開発計画

- 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。



4. システム選定と基本設計要求

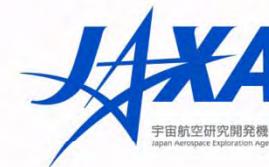
4.10地上系(2/2)



- 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いう。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。