

はやぶさ 2 プロジェクトの  
事前評価質問に対する回答

平成 23 年 6 月 27 日

宇宙航空研究開発機構

**【本資料の位置付け】**

本資料は、平成23年6月2日（木）に開催された第1回推進部会におけるはやぶさ2プロジェクトの説明に対する構成員からの質問に対し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の回答をまとめたものである。

● 評価項目 1（プロジェクトの目的・目標・開発方針）に関連する質問

1-1	プロジェクトの意義・目的（社会的・技術的）	3 ページ
1-2	プロジェクトの目標	4 ページ
1-3	工学目的 1 の目標（フル）の記載について	5 ページ
1-4	理学目的 2 の目標（フル）の記載について	6 ページ
1-5	Osiris-REx との関係	7 ページ
1-6	信頼度評価に係る開発方針	9 ページ

● 評価項目 2（システム選定及び基本設計要求）に関連する質問

2-1	ミッション達成の可能性向上に関して	10 ページ
2-2	衝突装置の地上試験での限界について	11 ページ
2-3	衝突装置について	12 ページ
2-4	衝突による鉱物の変性について	16 ページ
2-5	近赤外分光計の仕様の妥当性について	17 ページ
2-6	3.5 $\mu\text{m}$ までの分光計について	18 ページ
2-7	近赤外分光計に関して	19 ページ
2-8	サンプルの採取方法について	20 ページ
2-9	化学推進系に対する対策	22 ページ

● 評価項目 3（開発計画）に関連する質問

3-1	開発スケジュールに関して	23 ページ
3-2	実施体制（海外協力）	25 ページ

● 評価項目 4（リスク管理）に関連する質問

4-1	近赤外分光器のリスク管理	26 ページ
-----	--------------	--------

## ● 評価項目 1（プロジェクトの目的・目標・開発方針）に関連する質問

【質問番号 1-1】 プロジェクトの意義・目的（社会的・技術的）

【質問内容】

プロジェクトの意義・目的について、12ページでは科学、技術、社会の3要素が挙げられているが、13-18ページでは科学的意義のみしか説明されていない。技術・社会についても同等の記述があってしかるべきと考えられる。

月の重力や金星大気ではなくアメリカが選定した OSIRIS-REx も、その目標は、その先の有人探査を見据えた深宇宙探査そのものとされている。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 12~18 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

技術的な意義・目的につきましては、

- ・ 「はやぶさ」技術の成熟（サンプルリターン技術の確立）
- ・ 衝突体の衝突実証（新しい探査技術への挑戦）

を目的としています（14、17、18ページに説明が記載されています）。15-18ページは14ページに記載した目的についての説明を示したものであるため、科学および技術的な意義のみで社会的な意義については記載されておりません。

12ページに記載されている社会的な意義の具体的な例としては、ミッションにおいて国際協力を行うだけでなく、観測されたデータや取得されたサンプルを世界に公開することで、世界に貢献できると考えています。人材育成では、若手を積極的に取り込むことで次の世代に探査の技術や科学を継承していくことを考えています。また、「はやぶさ」のときには明示的には設定されていなかったアウトリーチの経費をあらかじめ見込んであり、社会への還元もより積極的に行っていく予定です。このことで、「はやぶさ2」を題材として幅の広い年齢層に科学や技術に親しんでもらうよう努めていきたいと考えています。

【質問番号 1-2】 プロジェクトの目標

【質問内容】

直後にアメリカが60gのサンプルリターンを計画している中で、はやぶさ2が科学的優位性を持つには、はやぶさ2において確実にリモセンあるいはサンプル分析において、生命起源に関わる何らかの情報を得ることがきわめて重要であるが、現状の開発段階でその勝算はどの程度と考えられるのか。

【資料の該当箇所】

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現在計画されているスケジュールで進めることができれば、米国のOSIRIS-RExより数年早く結果を出すことができます。OSIRIS-RExとは、取得されるサンプル量が異なっていますが、ミッションのフルサクセスに必要なサンプル量は、分析機器の能力から100mgあれば十分と判断しており、少量のサンプルの分析でも主要な科学的成果を得ることができると考えられます。

【質問番号 1-3】 工学目的1の目標（フル）の記載について

【質問内容】

サンプル採取に関して、地上でのシミュレーションの結果100mgが妥当であると判断されたとの説明があった。しかし、C型小惑星は飛ばして見なければ実際の密度などが判らないということも踏まえると100mgが妥当かどうか？目標数値を下げた方が無難ではないか。実際、100mgが採取できたなら、目標を超えた大きな成果になるわけですから・・・。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 20ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

サンプルの採取量については、使用する分析装置の能力から、サイエンスのフルサクセスを達成するために必要な量の見積もりを行い、最低限必要な量で50mg程度、通常であれば100mg程度必要と判断しており、この数値を記載しております。

一方で、御指摘の通りC型小惑星の密度は地上観測から推定された範囲（ $0.5\sim 4\text{g/cm}^3$ ）では広く不確定性があります。科学者が一般的に1999 JU3に対応する隕石として想定している炭素質コンドライトの平均的な密度は $3\text{g/cm}^3$ 程度（範囲としては $2\sim 4\text{g/cm}^3$ 程度）です。この両者の違いは、天体内部に空隙があることが原因と推定されており、1999 JU3の実際の表面物質の真密度は $3\text{g/cm}^3$ 程度であると予想しています。したがって、上記のサンプル量を確保するために我々は炭素質隕石を模擬するターゲットを用いるなど、これまで様々な岩石や砂礫層に対してサンプル採取のシミュレーション試験（衝突実験）を行ってきており、5g、300m/sの弾丸を衝突させることで、100mg以上のサンプルが採取できると判断しております。サンプル採取量としては、表面密度も重要であります。実験の結果から表面物質の強度や衝突する際の表面に対する角度などの影響も大きく、これらの不確定性も考慮して予測した最低限の量として評価しています。

【質問番号 1-4】 理学目的2の目標（フル）の記載について

【質問内容】

「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。」と記載されているが、この機能性、あるいは20cmで期待できる成果とは何か、少し説明が欲しい。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 20 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

衝突装置で生成されるクレータの予測最小サイズは2m程度（深さ50cm程度）です。空間分解能20cmで観測することができれば、クレータの内部を水平方向に10分割して観測することができ、クレータのサイズや形状を調べることが可能になります。クレータのサイズや形状は、小惑星表層および表層地下の物質の構造や強度によって決まるため、これらの観測を行うことで、探査対象小惑星の内部構造に関する情報が得られると考えています。また、クレータを生成する際に生じたイジェクタ（破碎され飛散した表面および表層地下物質）は宇宙空間に放出されるが、一部は小惑星表面に再集積すると考えられており、その飛散状況をクレータを中心とした100m四方の画像データから確認する予定です。衝突装置の衝突する地点が大きな岩塊である場合、イジェクタの最大破片は20cm以上あると期待しており、また大きな破片程表面から飛び出す速度も遅いことが知られているため、大きな岩塊がクレータからどの程度の距離に再集積しているかを、衝突前後の画像から確認することができれば、イジェクタの放出速度や放出量に関する情報が得られ、小惑星の衝突進化に関する基礎的なデータを取得することが可能になると考えています。なお、後者の目標は、衝突装置の衝突する表面の状態（大きな岩塊か砂礫層か）によるため、エクストラに位置付けています。衝突装置の衝突地点が砂礫層であった場合は、イジェクタに20cm以上の岩塊が含まれないことも予想されるため、その場合は、より降下接近した際の画像から、生成されるクレータ周辺に降り積もる微小サイズのイジェクタの盛り上がり（クレータリム）の高さ等を観察して、クレータ生成の物理現象および再集積過程に関する情報を得る予定です。

【質問番号 1-5】 Osiris-REx との関係

【質問内容】

推進1-1-3 添付資料の参考に「はやぶさ2」の2014年と2019年打ち上げが比較されていて、2014年の方が最適であることが記載されています。

NASAのOsiris-RExに確実に先行して成果を上げるためにも打ち上げが2014年になることが重要だと思いますが、打ち上げが遅れた場合には、NASAの目標と比較されることも予想されます。試料採取方法の違い、到達するC型小天体の試料に違いがあるのか？また、NASAの広報記事には近地球小天体の軌道予測に重要なヤーコフスキー効果の観測などスペースガードを目的としたものが述べられています。

前回の委員会でも話題になりましたが、本プロジェクトの目標にはスペースガード的な知見の獲得は無いのか、など今後のNASAとの連携協力の際にも関係すると思われるのでお尋ねいたします。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 99ページ、104ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ2」の打ち上げがバックアップの2015年にも打ち上げられなかった場合には、さらなる打ち上げウインドウを探すか、新しいターゲット天体を探すかのどちらかになります。後者の新しいターゲット天体については、継続して探したり観測を行ったりしていますが、今のところ見つかっていません。なかなか条件に合う天体が発見されるのは難しいと考えますので、これを当てにすることはできません。また、さらなる打ち上げウインドウについても、次に条件がよいのは2019年となってしまいますので、そうすると米国のOSIRIS-RExに遅れることとなります。

米国の方は、「はやぶさ2」に遅れをとってもOSIRIS-RExをやる意義があると判断したわけですが、日本も同様な判断をすることができます。小惑星サンプルリターンは、OSIRIS-RExと「はやぶさ2」の両方が行ったとしても、「はやぶさ」を含めて3例にしか過ぎません。仮にOSIRIS-RExが先行してしまったとしても、「はやぶさ2」の科学的意義は基本的には変わらないと考えます。その上、「はやぶさ2」の場合には、OSIRIS-RExが行わない人工クレーターをつくる実験や、さらにはそこからサンプルを取得することにも挑戦します。したがって、OSIRIS-RExに先行されたとしても、「はやぶさ2」は新しいミッションということになり、日本の小天体探査はフロントランナーであると言えます。もちろん、日本として往復探査の技術をより確実なものにしていくという技術的な意義は、全く薄れることはありません。

次にヤーコフスキー効果についてですが、これについて解析するためには、小惑星の表面状態について詳細なデータが得ることと、小惑星の正確な軌道を知ることが必要です。これらについては、「はやぶさ2」の科学観測項目が達成できれば得られるデータですので、ヤーコフスキー効果も研究の対象に入っています。「はやぶさ2」が取得したデータを使った個別のテーマは沢山ありますので、個々のテーマを明示していませんが、ヤーコフスキー効果も研究テーマの1つになります。

スペースガードについては、衝突装置を小型のものにしたために衝突しても小惑星の軌道は変化しないので、目的からは削除してあります。ですが、1999 JU3も地球接近小惑星ですので、この小惑星のいろいろな性質を調べることで、スペースガードとして天体衝突を回避する検討のためには有益な情報となります。

【質問番号 1-6】 信頼度評価に係る開発方針

【質問内容】

今回のミッションでは冗長性が追加されていますが、どのような方針に基づいて冗長性設計が行われていますか？信頼性に関する定量評価は実施されていますか？

【資料の該当箇所】

【回答者】 JAXA

【回答内容】

はやぶさ2は、（はやぶさ1同様）ミッションマイルストーンとなるイベントが直列的に接続されていることが特徴です。信頼性設計にあたっては、この直列イベントに関わる機器について、役割の重要度が高い順番に信頼性向上のリソースを割り振っていきました。結果として、探査機のバス機能（通信、熱制御機能）およびタッチダウンと巡航に直接かわる姿勢制御系の冗長性が強化されています。

はやぶさ2における冗長設計は以下の3つに分類されます。

- ・単系だがコンポーネント内部で冗長系が構成されているもの  
（データハンドリングユニット（探査機の中央計算機）など）
- ・完全2重系（複系）であるもの  
（姿勢制御系プロセッサ、リアクションホイール、トランスポンダ、イオンエンジンラスタなど）
- ・機能冗長  
（航法画像→狭視野カメラ、広視野カメラ、スタートラッカが機能冗長）

信頼性評価については、

(1) 探査機の基本バス機能に関する信頼性

たとえば、電源供給機能、リアルタイムコマンドの受信および処理機能、テレメトリの送信機能、姿勢系機能、電気推進機能など。

(2) 運用フェーズに関する信頼性

巡航フェーズ→ランデブーフーズ→グローバルマッピング→ホームポジション維持→タッチダウン→サンプリング→SCI運用→帰路巡航→リエントリ

に分類し、それぞれについてFTA (Fault Tree Analysis) を実施しています。これはトップダウン的な信頼性管理にあたります。またサブシステムの設計結果に対しては、他の衛星と同様に、FMECA (Fault Mode and Effect Criticality Analysis) および SPFA (Single Point Failure Analysis) を実施することで、ボトムアップ的な信頼性管理を実施しています。はやぶさ2では、これらの信頼性管理手法を活用して網羅的なリスク識別とそれに基づく信頼性設計を行っています。

## ● 評価項目 2（システム選定及び基本設計要求）に関連する質問

【質問番号 2-1】 ミッション達成の可能性向上に関して

【質問内容】

ミッション達成の可能性をシステム全体としてどのように高め確保するか、に関しての回答（33 ページ）に、+100kg の dry 質量増を計画し、そのうちの 50%を信頼性向上に、残りの 50%をサイエンス機器の増量に配分する、とあります。

50kg という増量は信頼性向上にとって十分有意義な量とは思いますが、配分を 50%と決めたがために採用を見合わせたような信頼性向上策は、ありませんか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 33 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

信頼性への配分 50%、サイエンス機器への配分 50%は、その配分に固執して、信頼性やサイエンス機器設計をしたわけではなく、いつでも修正可能な目安として設定していた数値であり、あくまで目的は信頼性の設計条件を満たした上でのサイエンス成果の最大化です。結果として、現設計において、おおよそ信頼性への配分 50%、サイエンス機器への配分 50%という配分が維持されています。

はやぶさ 2 において、システムリソース配分作業における信頼性向上とは、基本的にサブコンポーネントの冗長化です。はやぶさ 2 は、（はやぶさ 1 同様）ミッションマイルストーンとなるイベントが直列的に接続されていることが特徴です。信頼性設計にあたっては、この直列イベントに関わる機器について、役割の重要度が高い順番に信頼性向上のリソースを割り振っていきました。

しかし、すべてのサブコンポーネントを冗長化することは、リソースの圧迫が著しいとともに、はやぶさ 1 のシステム構成を著しく変化させることになり、はやぶさ 1 のヘリテージとはかけ離れた設計となるとともに、システムの複雑化が信頼性を落とすことに繋がるため、以下に分類される機器は冗長化をせず、はやぶさ 1 同様単系構成としています。

- ・機構部品および機構部品のドライバ（機構そのものを 2 つ持たない限り意味がないもの）  
（ex アンテナ駆動機構、IES ジンバル機構）
- ・センサーなどの末端機器とのインターフェースをつかさどる受動機能の機器  
（ex 姿勢系センサーと姿勢系プロセッサを結ぶインターフェースユニット等）
- ・機能冗長が確保できる機器  
（ex 航法カメラ群はタッチダウン時に狭視野カメラが広視野カメラの部分機能冗長をつかさどり、小惑星ランデブー時には、スタートラッカと左記カメラが相互補完的に機能する等）

以上は、50%のリソース配分を守るために諦めた信頼性向上対策ではなく、あくまでシステムの無用な複雑化を避けるために不採用とすることを期した方策です。

【質問番号 2-2】 衝突装置の地上試験での限界について

【質問内容】

衝突装置の実爆試験が計画されているが、その地上試験での限界について、どう考えて、どう対応するのか示して欲しい。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 51 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

地上試験では、実際の動作時とは主に以下の点で異なります。

- 1) 真空ではない
- 2) 距離が100m程度(実際は最長500m程度)
- 3) 放射線環境
- 4) 温度環境

1)については、地上試験では空気があることによる速度の減衰、飛翔方向のずれが大きくなる等の影響が考えられますが、ライナの飛翔速度については起爆位置に近いところで計測することにより、宇宙空間相当の性能が計測可能と考えます。また、飛翔方向のずれについては、地上試験は厳しい側になることも考慮して性能を評価したいと考えております。

2)については、ライナの成形時間が約1msec程度であることを考えると、ライナの飛翔性能を調べるために、100mの距離は十分であると考えております。前述のように宇宙空間では空気がなく、ライナの飛翔にとっての外乱源がないため、100mの実爆試験で問題なければ宇宙空間における500mの飛翔も問題なく評価可能と考えております。

3)については、宇宙空間における支配的な放射線（プロトンやガンマ線等）を最終実爆試験の前に照射し、機能・性能に問題がないことを評価致します。

4)については、宇宙空間にて想定される温度環境をもとに熱設計を行い、最終実爆試験の前に熱真空試験を実施し、機能・性能に問題がないことを評価致します。

【質問番号 2-3】 衝突装置について

【質問内容】

衝突装置は他分野で実績のある技術であるをご説明されていますが、公開が禁止されている分野での実績であり、実績内容は比較的近距离での発射・衝突に限定されていると考えます。

推進 1-1-3 46 ページに衝突装置の仕様が記載されていますが、現時点でどの程度、仕様が達成できる見込みがあるのかについて、具体的裏付けとともにご説明願います。質量 2kg の銅板を速度 2km/s に加速衝突させるとありますが、飛翔距離、目標地点からの許容誤差等について、数値を示して可能な限り具体的な説明をお願いします。

目的の小惑星表面のレゴリス等に秒速 2km で銅板変形体が衝突した場合のクレータ形成について、数値シミュレーションがありましたら提示願います。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 42~47 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

衝突装置の各仕様の成立性については、以下の通りの評価を実施し、要求仕様を満足できる見込みを得ています。

質量： 設計予定の部品、材料の積み上げにより確認

サイズ： 要素試験での爆速の確認と加工性からの評価

分離速度、分離性能： 分離時にスピンをかけながら分離し、分離後スピン安定させるヘリカルスプリングを使用した分離機構を採用する。分離スプリングのセット高を調整することで分離速度要求を満足することが可能。また、分離性能については、既開発品分離スプリング実績から要求を満たすことを確認済み。

飛翔距離、目標地点からの許容誤差等については、母船分離時位置速度制御精度、分離精度等を考慮し、着弾場所の評価をモンテカルロシミュレーションを使用して実施しています。その結果を以下に示します。図1は着火時(分離後2400秒)の衝突装置の位置の散らばりを示しています。この結果から、飛翔距離は数10m~500m程度の間で位置することが分かります。図2は着弾位置の散らばりを示しています。目標地点は図中の点がモンテカルロシミュレーションの各ケースにおける着弾位置を示しており、円状の線は悪くてもこの範囲に着弾するであろう範囲を示しています。これにより着火時姿勢が最悪でも半径200mの円内に衝突させることが可能であると予想しております。図からわかるように、最悪姿勢時の衝突位置の散らばりは半径200m程度と大きいですが、モンテカルロシミュレーションの大半のケースで半径100m以内に衝突させることが出来ております。半径200m程度の範囲であれば、生成したクレータを探すことも可能であると判断しております。

小惑星への SCI ライナの衝突を模擬するために、数値シミュレーションを行いました。爆薬部における銅の形状、鋼体の縦横比により、ライナ形状は変化するという結果が得られております。そこで、くさび形状および平板形状の場合についてライナ形成過程を調べました。これは、クレータ形成におけるライナ形状の影響を調べるために行いました。ライナ形状の形成シミュレーション

を図 3 に示します。ライナ速度 2km/s には、ライナ射出後、約 0.1ms で到達しました。銅ライナは 1ms 以内に成型されます。ライナの爆薬部の射出過程はオイラー法で計算されました。

上記で計算されたライナの形状であるくさび型ライナおよび平板ライナを小惑星表面に衝突させたときのクレータ形成の数値シミュレーション(Smoothed Particle Method)を行いました。両者の結果を図 4 に示します。ライナによるクレータ形成後、探査機が試料採取を安全に実施できる表面は、平坦な地域であり、ここではターゲット表面として、イトカワの Muses-sea 領域のような平坦なレゴリスが存在する領域を想定しております。くさび型ライナの砂への衝突は、本計算結果により、直径 $\sim 2\text{m}$  のクレータが形成されるという結果となっております。一方、平板ライナの砂への衝突は、 $\sim 1.3\text{m}$  のクレータが形成されております。これにより、ライナ形状として、平板よりもくさび型の方がクレータ形成効率がよく、衝突装置のライナとしてくさび型を採用することといたしました。

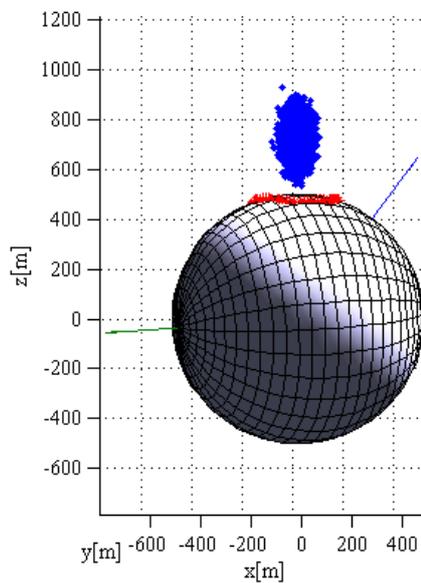


図1: 着火時の衝突装置位置の散らばり

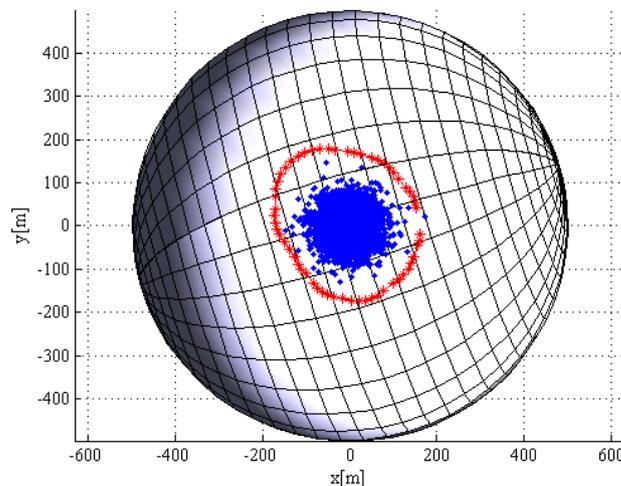
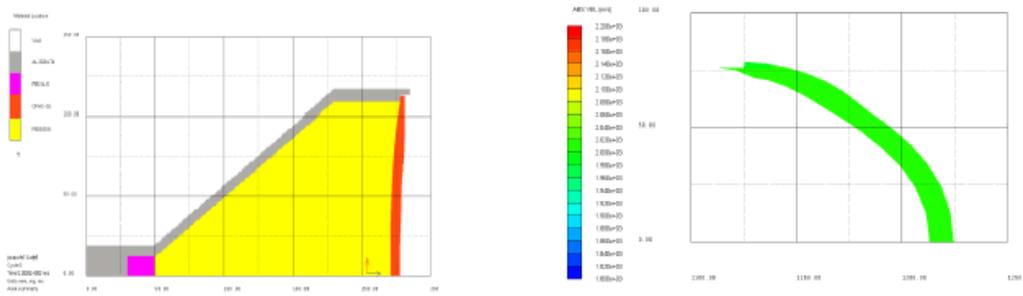


図2: 着弾位置の散らばり

### (1)くさび型



### (2)平板

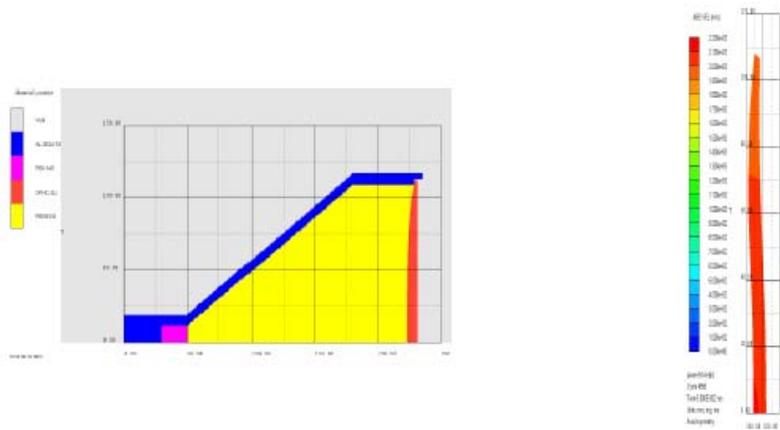
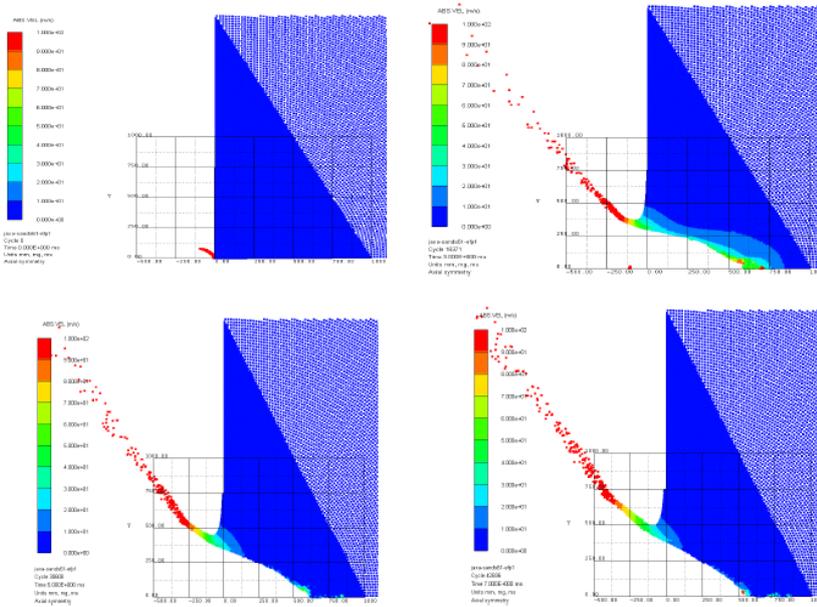


図 3: SCI の爆薬部モデル。(1)、(2)とも左図は爆破前の爆薬部構成を示します。構体の内部には PBX(黄色)が充填されており、その先端に銅ライナ(赤)が装着されています。

## (1)くさび型結果



## (2)平板結果

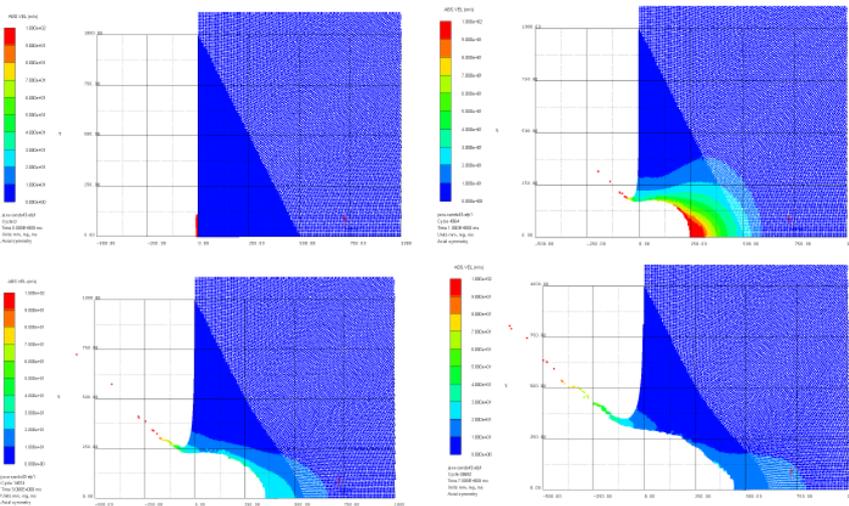


図4: レゴリスへのクレータ形成のスナップショット。衝突後時間経過とともにクレータサイズが成長。銅ライナは図の左から正面衝突すると仮定。

【質問番号 2-4】 衝突による鉱物の変性について

【質問内容】

一般に固体に物体が高速衝突すると衝撃波が発生し、非衝突体中を超高圧力衝撃波が通過します。固体が衝撃圧縮されると高い圧力と同時に高い衝撃温度が発生します。衝撃波が通過後、希薄波が発生し、非圧縮体は断熱膨張して、衝突面方向に噴き出します。非衝突体がレゴリスのような空孔を含む集合体の場合、空隙が潰れるときに非常に高温になり、現象は極めて複雑です。衝突クレータの底部の鉱物は衝撃圧縮、断熱膨張、残留温度による効果によって衝撃変性している可能性が高いと考えられます。金属板衝突による方法によってフレッシュな鉱物を採取することは本質的に困難と考えます。この懸念についての回答をお願いします。

【資料の該当箇所】

【回答者】 J A X A

【回答内容】

Cuインパクトを小惑星表面（砂礫に覆われてると仮定）に2km/sで衝突させたとき、衝突点直下で、~1GPaまで圧力が上昇します。ターゲットである砂礫のバルク密度、音速が低いため、到達圧力は、硬い岩石と比較してあまり大きくならないという結果となります。その後、衝撃圧力は砂礫中では大きく減衰します（砂礫のような高空隙物質の場合、空隙の少ない岩石と比べ、衝撃波の減衰率が大きく、空隙率50%の固体で衝撃圧力の減衰率は距離の4乗に比例）。また、温度上昇は、衝突点直下では、数百°C上昇しますが、等圧核の~2倍の深さになりますと、100°C以下にまで急激に低下いたします。

はやぶさ2のターゲット天体は、含水鉱物を含んだ炭素質コンドライト隕石の母天体である始源的な小惑星とされています。過去の含水鉱物を含む炭素質コンドライトの衝撃実験では (Tomeoka et al., 1999; Tomeoka et al., 2003; Tomioka et al., 2007)、衝撃圧力が数 GPa を越えると含水鉱物でも特に弱いものは脱水するなど知られていますが、1GPa程度では最小限に抑えられると考えられます。また、炭素質コンドライトは強度も弱く、破碎が卓越することが予想され、隕石の観察からもそれが示唆されています。したがって、今回回収する内部試料は衝撃の影響の少ない破碎試料であることが期待されます。ただし、今後、小惑星模擬試料にインパクト衝突条件に近い衝撃試験を実施し、定量的な評価を行いたいと考えております。

【質問番号 2-5】 近赤外分光計の仕様の妥当性について

【質問内容】

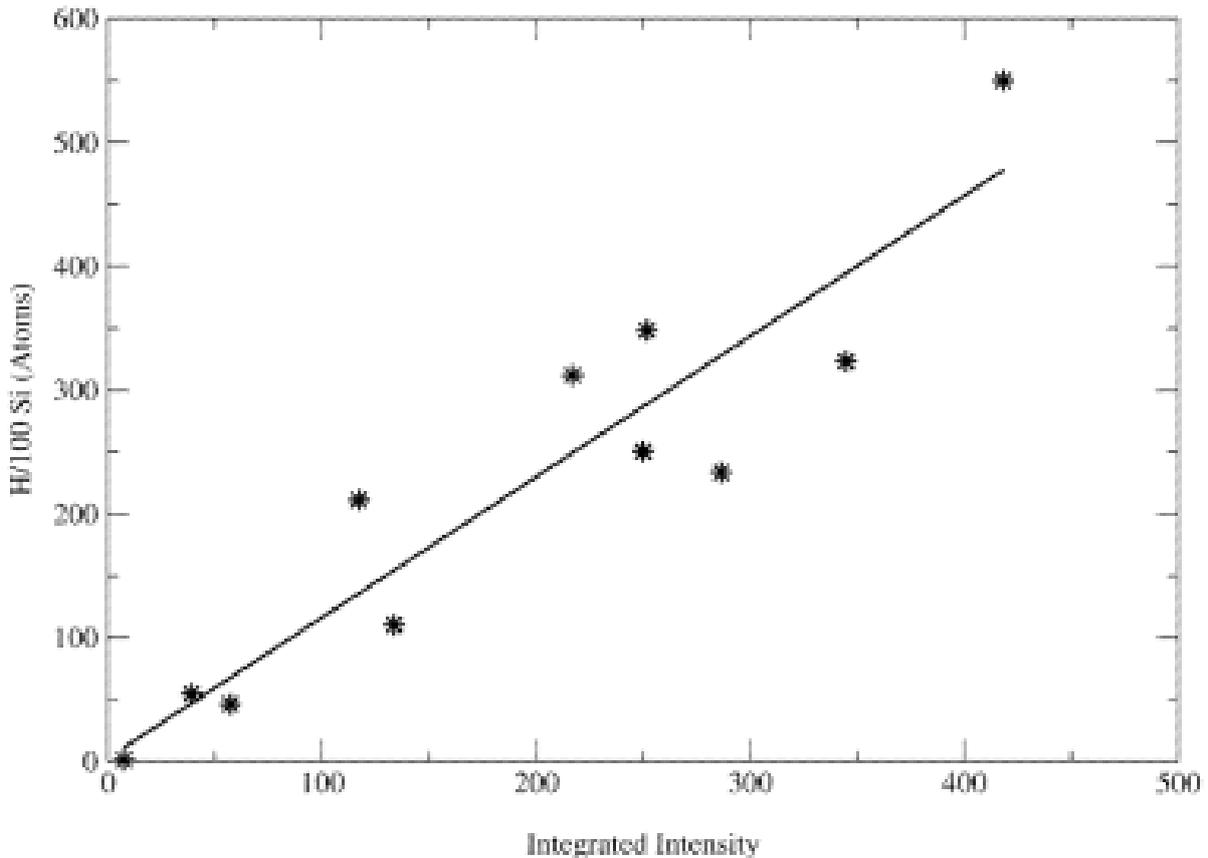
理学目的のミニマムは、「表面物質に関する新たな知見を得る」ということになっている。具体的には水・含水鉱物の分布量を求める、とされている。具体的にどのようにしたら、「ある／なし」ではなく、「量」の情報を得ることが可能なのかを説明いただきたい。NIRSの改良と言うことであるが、反射分光で定量が可能なのであろうか？

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 20、56、82 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

理学目標のミニマム達成に関して、近赤外線分光計(NIRS3)が目標とするのは水・含水鉱物の検出である。まずは有無の確認を行い、サンプリング地点の選定に関する情報を提供する。次に含水鉱物などの水の吸収が検出できた場合は、含水度の相対的な違いを調べる。具体的には3ミクロン吸収の強度と水素原子や含水鉱物の含有量の間に関連関係がある(下図)ことを基に、小惑星表面上での相対的な変化量を調べることを想定している。3ミクロン吸収の強度は、測光補正及び熱放射補正を施したスペクトルを用いて求められる。熱放射補正を除くスペクトルデータの解析は、はやぶさの近赤外分光計で実績がある。



炭素質コンドライトを用いて測定された3ミクロン吸収の強度(横軸)とH/Si比(縦軸)の相関関係  
(Rivkin et al., MAPS, 2003)

【質問番号 2-6】 3.5 $\mu$ mまでの分光計について

【質問内容】

今回の探査目的が水・生命であることを考えると、3.5 $\mu$ mまでの分光計により有機物に由来するC-H結合の存在の観測を期待したいが、その可能性はいかがか。リスク管理項目としては、早期に進めるという内容しか書かれていないが、これで問題はないか。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 20、56、82 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現在搭載を予定している近赤外線分光計の観測波長域は3.2 $\mu$ mまでです。これはInAsのカットオフ波長で決まっており、より長い波長域に感度を持たせるためには、別の種類の半導体検出器が必要で、より低温での駆動条件が必須になります。また有機物の吸収バンドは狭く、水・含水鉱物の吸収バンドを観測する場合に比べて、観測波長分解能をあげる必要があり、高いS/Nを得るためにはより低温・長時間の観測が必要になるため、トレードオフの結果、はやぶさ2では水・含水鉱物の検出に特化した分光計を採用することにしました。

なお、近年の隕石研究では、水の存在または水質変成を生じている箇所と、有機物の存在箇所には強い相関があるという事実もあり、はやぶさ2では、水や水質変成の程度に応じてサンプリング地点を選定し、有機物の調査は採取したサンプルの分析で行い、水と有機物の相関や総合作用についても地上での分析で調べることを考えています。

リスク管理としては早期に開発を進めることで対応の基本としていますが、万が一開発に課題が出た場合には、水・含水鉱物の検出に特化して（データ解析に使用する観測波長域を限定して）、より熱設計的に確実な仕様で開発を進めることも対応の一つと考えています。

【質問番号 2-7】 近赤外分光計に関して

【質問内容】

近赤外放射計では、冷却を放熱板による受動的冷却で実現させる、とあります（推進1-1-3、59ページ）。

- (1) 探査機の外観図（30ページ）に分光計ならびに放熱板の取り付け位置を示して下さい。
- (2) この受動的冷却が、探査機の小惑星周辺での運用に、はやぶさの場合には無かった制約条件を課することになるとは思います。その結果、運用の複雑さが大きく増すことにはなりませんか。

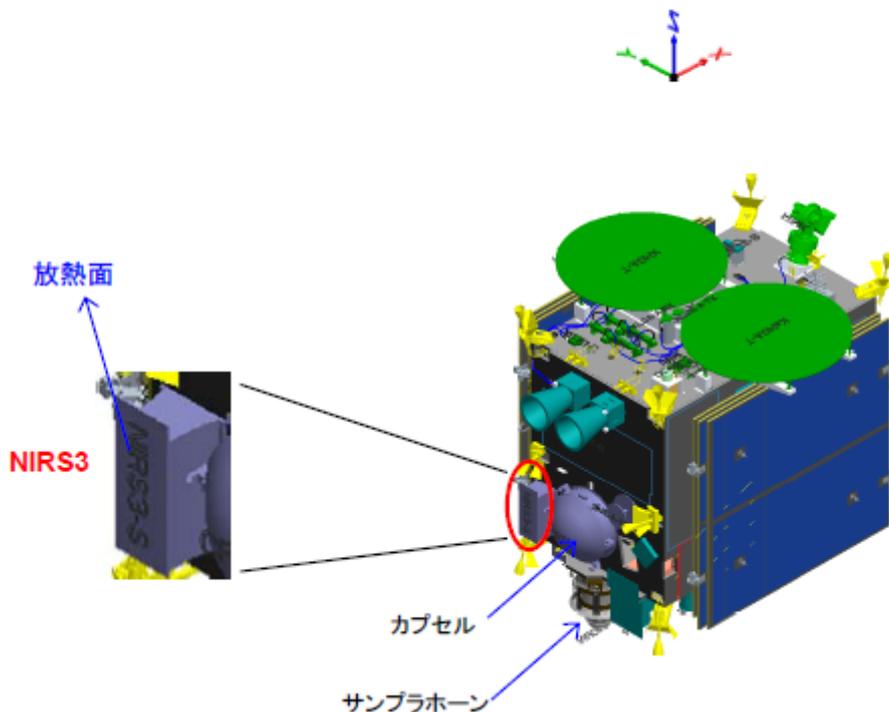
【資料の該当箇所】 推進1-1-3 59ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

- (1) 探査機の外観図に分光計の取り付け位置を示しました（下図）。放熱板は図で示した外部面になります。
- (2) 分光計の取り付け位置は、探査機の-X面と呼ばれる面の外部になります。-X面ははやぶさでも常に太陽光が入射しないように運用制約していた面であり、放熱面として位置づけられた面であるため、新たな運用制約を課することにはなっていません。なお、この分光計の観測は高度1km程度までの運用を想定しており、小惑星表面からの照り返しの影響を大きく受ける高度での観測は行わない予定です。

### NIRS3搭載位置



【質問番号 2-8】 サンプルの採取方法について

【質問内容】

今回、実施しようとしている弾丸発射によるサンプルラホーンでの試料の採取方法について、他の方法とのトレードオフなどから妥当性を示すこと。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3

【回答者】 JAXA

【回答内容】

・弾丸（プロジェクタ）方式の妥当性について

小惑星探査におけるサンプルリターンミッションで考慮すべき重要な点は、現地に到着してみないとサンプリングする環境（温度環境、自転軸の向き、重力、表面の状態など）が正確には分からないということである。

このため、さまざまな環境条件において、サンプリングできる確率を上げるよう設計する必要があり、設計仕様は上記の条件を地上からの観測結果を元に仮定して設定する必要がある。

・サンプリング形式について

サンプリング形式として、大きくわけて2つある。

1. タッチダウン形式

：表面に接地している時間を極力短くし、ごく短時間でサンプリングする

2. 着陸形式

：表面に着陸をし、サンプルに必要な時間だけ留まってサンプリングする

この2つを比較すると、着陸方式は軟着陸する必要がある、温度環境によって高温になりすぎる、微小重力下で作業する際の反力を抑え続ける必要があることなどから、タッチダウン方式の方が確率を上げられると考えられる。

次ページに、更に詳細に分類したサンプリング方式のトレードオフについてまとめる。

## 各方式のトレードオフ

方式	伸展ホーンもしくは展開型ホーン形式				その他				
	弾丸	ハンマー	ガス噴射	爆薬	ロボットアーム	コアリング/ドリル	投網	ブラシ	粘着パッド
※採取したサンプルをキャッチャーに収め、カプセルに搬送する機構は共通									
説明	弾丸を小惑星表面に衝突させ、イジェクタをサンプルする	ハンマー機構(火工品含む)によって、表面の叩き、イジェクタをサンプルする	ガスを噴きつけ、浮遊した試料をサンプルする	爆風によって浮遊した試料をサンプルする	ロボットアーム先端のツールで試料を掴みサンプルする	コアラーもしくはドリルによって表面を掘り、試料をサンプルする ※採取後に巻き取る必要あり	投網方式によって、網状もしくは膜状の構造に試料を採りこみサンプルする ※採取後に巻き取る必要あり	ブラシ状の構造を表面に押し付ける。もしくは回転接触などをさせ、ブラシの隙間に試料を絡め採る	粘着材を表面に押し付け、試料を付着させてサンプルする
接地方式	タッチダウン	タッチダウン or 着陸	タッチダウン	タッチダウン	着陸	タッチダウン or 着陸	タッチダウン or 着陸	タッチダウン or 着陸	タッチダウン or 着陸
重量	◎	○叩く速度が遅い場合にはハンマー重量が必要	◎	◎	△機構が複雑	○	○	◎	◎
サンプリング制御	○発射のタイミングを合わせる必要あり	○叩くタイミングを合わせる必要あり	○噴射のタイミングを合わせる必要あり	○噴射のタイミングを合わせる必要あり	△衛星の制御とアームの制御を協調する必要あり	△ドリルに力を与えつつ姿勢を保つのは難しい	△投網の放出制御は難しい	◎	◎
必要接地時間	◎	◎	◎	◎	×	△数cm下まで掘るにしても時間がかかる	○	○	◎
微小重力の影響	◎	◎	◎	◎	△作業中、反力を保障する必要あり	△穴を開ける間、反力を保障する必要あり	×微小重力下で投網の挙動を制御するのは難しい	◎	◎
サンプルへの汚染	○サボから火工品のガスが漏れる場合には汚染の可能性あり	○同左	×	×	◎	○火工品のガスが漏れる場合には汚染の可能性あり	◎	◎ブラシがテフロンであれば問題ない	○粘着材の材質によっては汚染の可能性あり
耐宇宙環境	◎	◎	◎	◎	○モータ、ドライバ等電子機器が多い	○巻き取る機構部に電子機器が必要	○巻き取る機構部に電子機器が必要	○ブラシを回転させる場合には電子機器が必要	◎
耐温度環境 ※小惑星に接近すると高温になる	◎	◎	◎	◎	△	◎	○	○	○
消費電力	◎	◎	◎	◎	×	○	△	△	◎
機構の複雑性	◎	○	◎	◎	×	△	△	△	△
ローカルな地形への対応性(傾斜、窪み等)	○ホーンの柔軟性で対応	△	○ホーンの柔軟性で対応	○ホーンの柔軟性で対応	○アームで傾斜にならうことはできるが自律制御は困難	◎	◎	○	○
サンプリング地点が砂状(~数mm)状への対応性	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
サンプリング地点が砂利状(数mm~数cm)への対応性	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
サンプリング地点が岩石状(数cm~)への対応性	○大きな岩でも砕くことができる	△砕く能力に限界がある	×	×	×大きい試料を掴むには専用のツールが必要	×	△	△	△
評価	◎	△	×	×	△	△	×	△	○

トレードオフの備考として、タッチダウンもしくは着陸時に採取した試料はキャッチャー内に納め、カプセルまで搬送する必要があるが、これは共通する技術課題として、トレードオフ内に含めていない。試料をどのように採るかについての方式を検討した結果である。

トレードオフ結果より、環境条件が不確定な小惑星で試料をサンプリングするためには、接地時間が短く、かつ、表面の状態(砂、砂利、岩など)に対応できる方式として、弾丸(プロジェクト)方式が有効であると考えられる。

【質問番号 2-9】 化学推進系に対する対策

【質問内容】

はやぶさミッション以外でもこのところ化学推進系に不具合が発生している。設計のみではなく、作業体制、品質保証体制等についても見直しが必要と思いますが現状どのような計画になっていますか？設計的にも信頼性第一に考えるのなら1液式にすることも選択肢と思いますが、どのように考えていますか？

【資料の該当箇所】

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ2」プロジェクトとしては、今後、他衛星など不具合情報とその動向を随時取り込みつつ、信頼性の向上を図っていく予定です。なお、設計については、これまでの不具合調査で得られた知見を随時情報収集し、積極的に反映することで、再発防止・リスク軽減を進めています。

次に推進系を1液式とすることについては、検討を行いましたが、比推力が2液式に比べて劣るため、搭載燃料の重量が大幅に増加します。また、タッチダウン時の精度の高い姿勢制御要求から、10msecの短パルス噴射が必要ですが、1液式ではその短パルス噴射で要求する能力が出せないため、2液式を採用する方針です。

## ● 評価項目 3（開発計画）に関連する質問

【質問番号 3-1】 開発スケジュールに関して

【質問内容】

開発スケジュールに関して、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、それから組み立て、試験に進む、とあります（推進 1-1-3、67 ページの図）。厳しいスケジュールと見受けられます。

重点搭載機器や開発要素の多い搭載機器（サンプラ、衝突装置、近赤外分光計、他）に関わるスケジュールをこの図に平行して示して、全体スケジュールが成立していることをお示しいただけませんか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 67 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

重点搭載機器や開発要素の多い搭載機器としては、衝突装置と近赤外分光計と認識している。その開発スケジュールをマスタースケジュールと対比して以下に示す。

次ページに示すとおり、両搭載機器の開発として、FY25初頭の探査機組立に向けて、衝突装置についてはFY23中頃に製造・試験（一部機能は一噛で確認）を開始し、近赤外分光計についてはFY23末頃に製造・試験を開始する。また、これら各試験を実施するため、FY22中頃より基本設計等を開始することで、各機器の開発スケジュールとマスタースケジュールは成立する。

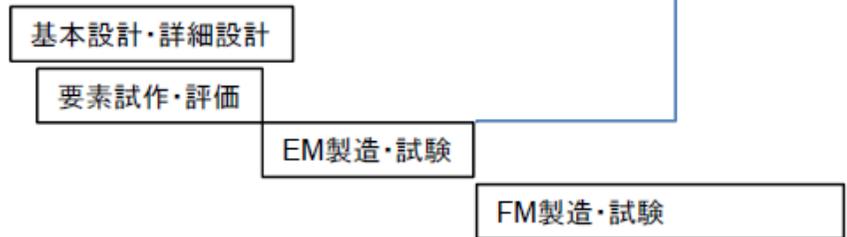
・マスタースケジュール

年度	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26
	FY2010	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014
主要イベント	▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その1) ▲新機器RFP ▲システム設計審査会(SDR) ▲プロジェクト移行審査	▲宇宙開発委員会(SAC)事前評価(その2) ▲基本設計審査会(PDR) ▲詳細設計審査会(CDR)	▲一噛み	▲納入	▲打上
開発フェーズ	設計	製作	組み立て・試験	組み立て・試験	射場・打上準備

・衝突装置開発スケジュール



・近赤外分光計開発スケジュール



図：マスタースケジュールに対する衝突装置および近赤外分光計の開発スケジュールについて

【質問番号 3-2】 実施体制（海外協力）

【質問内容】

アメリカがOSIRIS-RExをスタートさせることとなり、真正面からぶつかることとなるが、今後の協力体制について、積極的な対応を取る予定はあるか？第1回推進部会では、サンプル交換の可能性に言及されていたが、採集予定量に大きな違いがあるのにそれは可能か？

あるいは、その他の何らかの協力体制を取る可能性があるか？

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 71ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

現時点でOSIRIS-RExについては、米国のNASAとJAXAとの間でまだ議論を持っていませんが、相互に協力する体制を作って科学的成果をより増大させる方向に進めていきたいと考えています。

## ● 評価項目 4（リスク管理）に関連する質問

【質問番号 4-1】 近赤外分光器のリスク管理

【質問内容】

近赤外分光器は新規開発項目であるが、これは理学目的のミニマムサクセスにかかわるので、それがどこまで保証されているのかをうかがいたい。万が一、時間的に間に合わなかったとき、バックアップとしてどのようなことを考えているのか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 20、56、82 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

検出器・光学系については、これまで先行して開発確認している技術を用います。宇宙仕様についても、光学系はすでに実績のある硝材の組み合わせを想定しており、検出器についても、InAsとInGaAsの違いはありますが、はやぶさで搭載した検出器と同一メーカーの製造品を採用予定で、耐放射線性能、耐衝撃性能に関しては大きな問題はないと考えています。開発スケジュールとしては、EM品を今年度製作し確認予定です。課題としている熱設計に関しては、熱解析レベルであるため、EM品の試験の段階で熱設計の妥当性を確認する計画です。

万が一時間的に間に合わなかった場合のバックアップとして、光学航法カメラ（ONC-T）の多色フィルタに $0.7\mu\text{m}$ バンドを検出するためのフィルタを追加しています。 $0.7\mu\text{m}$ の吸収バンドは、 $3\mu\text{m}$ の水に関する吸収バンドより反射スペクトルの吸収深さが浅いですが、地上観測でもすでに検出されており、ONC-Tの想定する性能で制約はあるものの検出可能です。実際、小惑星1999 JU3については、地上観測で $0.7\mu\text{m}$ の吸収が観測されているので、ONC-Tを用いてサンプリング地点の選定のための必要な情報を提供することができると考えています。また $0.7\mu\text{m}$ の吸収バンドの有無と小惑星表面の地形等との相関を調べることで、小惑星表面における水質変成の過程等に関する新たな知見が得られ、ミニマムサクセス達成にも貢献できると考えています。もちろん、 $3\mu\text{m}$ の吸収バンドも観測できれば、 $0.7\mu\text{m}$ の吸収と比較することで、さらに進んだサイエンス成果を挙げることができます。