

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 22 年 7 月 26 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22年7月16日（月）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（プロジェクトの意義の確認））に関連する質問

1-1	「はやぶさ」の科学上の成果と探査のシリーズ	3 ページ
1-2	鉱物・水・有機物の相互作用	5 ページ
1-3	深宇宙港とは何か	6 ページ

● 評価項目 2（プロジェクトの目標）に関連する質問

2-1	探査ロボット	7 ページ
-----	--------	-------

● 評価項目 3（プロジェクトの開発方針）に関連する質問

3-1	Lesson-Learned に基づく改善	8 ページ
3-2	技術的意義の具体化について	9 ページ
3-3	目標について	10 ページ
3-4	「はやぶさ」ミッションからの教訓の取り込み	11 ページ
3-5	「はやぶさ」のサンプルについて	13 ページ
3-6	試料の解析について	15 ページ
3-7	サンプル回収法	16 ページ

● 評価項目 4（その他）に関連する質問

4-1	搭載推進薬量	17 ページ
4-2	「はやぶさ」ミッションからの教訓（P.22）に関する質問 1	18 ページ
4-3	「はやぶさ」ミッションからの教訓（P.22）に関する質問 2	19 ページ
4-4	観測機器に関する質問 1	20 ページ
4-5	小型惑星での重力	21 ページ
4-6	ミッション設計要求と技術開発項目について	22 ページ
4-7	観測機器に関する質問 2	23 ページ
4-8	衝突体衝突による飛散物の影響	24 ページ
4-9	インパクトの仕様について	26 ページ
4-10	衝突装置	27 ページ
4-11	観測機器に関する質問 3	29 ページ

● 評価項目1（プロジェクトの目的（プロジェクトの意義の確認））に関連する質問

【質問番号1-1】 「はやぶさ」の科学上の成果と探査のシリーズ

【質問内容】

太陽系科学探査はS型小惑星、C型小惑星、D型小惑星と一連のシリーズで探査をすることが重要であると理解しました。本件に関して下記を質問します。

(1) ハヤブサの科学上の成果

工学上の成果は喧伝されており広く認められていますが、科学上の成果は一般的には詳らかになっていません。サンプルが取れているかどうかは別として、光学観測等でS、C、Dと、シリーズの探査を行なう出発点としてのS型小惑星に関する探査の成果は得られているのでしょうか？

(2) C型小惑星探査で期待される主な成果

期待される主な成果は水とアミノ酸の存在と理解しても良いですか？地下物質を露出することが出来れば、光学観測等のリモートセンシングで相当までの成果がえられるのでしょうか？それともサンプルリターンが必須ですか？

(3) D型小惑星探査の課題

宇宙検疫とはどのような事項でしょうか？将来的に実現性はあるのでしょうか？

【資料の該当箇所】 推進1-1-3

【回答者】 JAXA

【回答内容】

(1) 「はやぶさ」の科学上の成果は、雑誌Scienceの2006年6月2日号に特集として掲載されています。ここには、「はやぶさ」に搭載してありました可視分光撮像カメラ（AMICA）、近赤外線分光器（NIRS）、蛍光X線分光器（XRS）、そしてレーザ高度計（LIDAR）の4つの観測装置からのデータを解析した論文が7編掲載されています。主要な科学的成果を一言で言えば、微小なS型小惑星の素性を初めて明らかにしたことで、特に、約500mの大きさの小天体が“瓦礫の寄せ集め”（ラブルパイル構造）であることを初めて示したことが画期的な成果となっています。このことで、微小小惑星の進化過程の一端が明らかになりました。

また、S型小惑星は地球に落ちてくる普通コンドライトという隕石の母天体であると言われていますが、このことも至近距離で確認したことになります。最終的には、取得されたサンプルで確認されるべきことですが、小惑星近傍からの詳しいリモートセンシング観測によってもこの考え方に矛盾がないことが示されました。さらに、表面に宇宙風化と呼ばれる現象も確認し、地上観測によるデータの解釈に重要な手がかりを与えることにもなっています。

(2) C型小惑星は、有機物や含水鉱物に富んでいると考えられていますので、鉱物に加えて有機物や水についても、太陽系初期の情報が得られると考えています。アミノ酸が見つければ大きな成果ですが、アミノ酸に限らず有機分子の同定ができれば、太陽系の起源を研究する上で非常に重要なデータとなります。また、地下の物質も採取できれば、宇宙風化を受けていない（あるいは、宇宙風化の度合いの少ない）物質も手に入れること

ができ、物質の変化についても情報が得られることとなります。リモートセンシングでもある程度情報は得られますが、サンプルを採取して地上で分析することが必須であると考えます。

- (3) D型小惑星については、対応する隕石がこれまで1つしかないと言われており、その物質についてほとんど分かっていません。これに対して、S型やC型小惑星については、対応する隕石が多数、地球に落ちてきていると考えられています。したがって、S型やC型の小惑星から物質を地球に持ち帰っても特に問題はないですが、D型小惑星については物質が未知であるため、例えば、地球の生態系に有害となる生命体が存在しないという保証がありません。このような場合には、最初は採取した物質を隔離して厳密に管理する必要があり、これが宇宙検疫になります。物質を調査した結果、特に問題が無いことがわかれば、隔離するような必要はなくなるわけです。特に火星からのサンプルリターンなどを行うときには、この宇宙検疫が重要になり、そのための施設も作る必要があります。

**【質問番号 1-2】** 鉱物・水・有機物の相互作用

**【質問内容】**

目的として、C型小惑星の物質科学的特性を調べることとあり、特に「鉱物・水・有機物の相互作用」を明らかにする、とあります。初歩的なことで恐縮ですが、この「相互作用」についてどのようなことが想定されるのか、p.11の中央下の図の意味も含めて、ご説明いただけませんか。

**【資料の該当箇所】** 推進1-1-3

**【回答者】** JAXA

**【回答内容】**

最近の地球外物質研究の進展により、始原物質形成の段階まで遡ると、地球や海、生命の原材料物質である鉱物、氷、有機物が相互に化学反応を起こし、物理的に作用しあい、構造をつくっていることがわかってきています。例えば、初期太陽系の始原氷の証拠が水との反応できる鉱物の酸素同位体に残されていることがわかったり、隕石中で含水鉱物と有機物の存在分布の相関が見られたり、氷を中に含んでいたと想像される有機物膜が見つかったりなどです。隕石中に見つかるアミノ酸の形成にも水が反応に関わっていると考えられます。このように太陽系始原物質において鉱物、氷、有機物が物理的に化学的に相互に関係しあっていることを本ミッションでは「相互作用」と表しています。有機物や水は化学反応によって、鉱物が固着する糊の役目を果たす可能性もあり、惑星、海、生命の材料物質がそもそも構造を持ち得たのもそれらの相互作用のためである可能性もあります。これらの研究の進展に日本人研究者は大きな貢献をしており、「はやぶさ2」で掲げる科学目標として最適なものと考えております。

11ページの図は相互作用によって構造がつけられる様子をイメージであらわしたイラストです。具体的に明らかにする「相互作用」および実際におこなう分析は以下のとおりです。

1. 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原度の推定、プレソーラーグレイン種類・存在度、鉱物年代測定
2. 有機物-鉱物相互作用：有機物・鉱物分布状態、希ガス分析・担体同定
3. 有機物-水相互作用：アミノ酸（カルボン酸、糖）のキラリティー・分子・同位体組成
4. 水-鉱物相互作用：小惑星氷、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、始原物質の水質変成作用の解明
5. 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

【質問番号 1-3】 深宇宙港とは何か。

【質問内容】

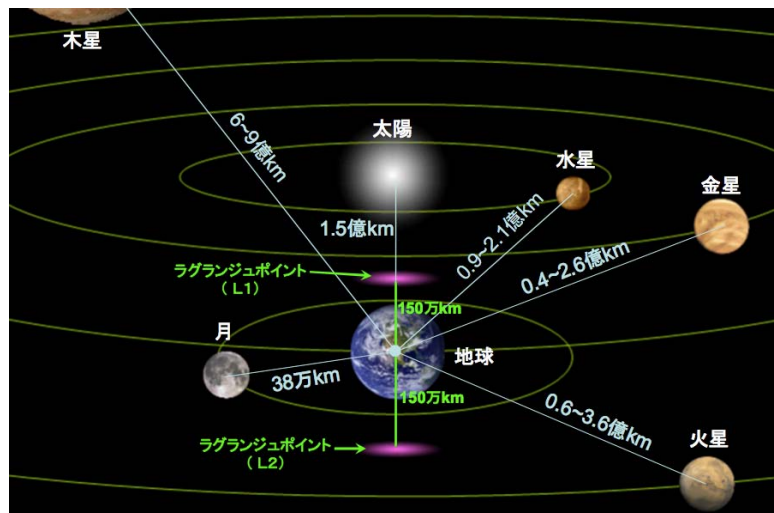
将来の探査技術の基盤とし、さらに「深宇宙港構想についてのアプローチともなる」とありますが、深宇宙港とは何でしょうか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 13 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

深宇宙港といいますのは、太陽-地球系がつくるラグランジュポイント（直線解）の $L_1$ ないし $L_2$ に、太陽系空間に出かけていくための“基地”となるようなベースを作る構想です（下図）。宇宙港から探査機を打ち出す方が地球から探査機を打ち上げるより楽ですから、ここを探査機のスタート地点、あるいは、帰還地点とすることが考えられます。また、ラグランジュ点という力学的に特殊な場所ですので、それを利用した宇宙観測なども考えられます。さらには、有人ミッションの起点としての可能性もあります。（詳細はJAXA長期ビジョンに記載しております。）



## ● 評価項目 2（プロジェクトの目標）に関連する質問

【質問番号 2-1】 探査ロボット

【質問内容】

プロジェクトの成功基準（p. 17）、工学目的 1 の目標（フル）に、「探査ロボットを小惑星表面に降ろす」とあります。これは、降りた後に行う活動も含めた記述と思います。

念のため、この探査ロボットは、降りたあと、何をするのか、要約してご説明いただけますか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3

【回答者】 JAXA

【回答内容】

探査ロボットは降りた後、以下を実施することを計画しています。

- ・ 小惑星表面での移動探査の実証  
（微小重力下において所定の位置に移動（ホップ）することを試みます。）
- ・ 着陸点周辺の表層環境のデータ取得  
（カメラによる近接撮像や、プローブを用いた表面温度計測を試みます。）

なお、「はやぶさ 1」で達成できなかったことの遂行することを工学目的 1 としています。ですので、探査ロボットを小惑星表面におろすところまでを工学目的 1 の目標（フル）と定義しており、降りた後にデータを取得して科学的成果を挙げることは、理学目的 2 の目標（エクストラ）と定義しています。



● 評価項目3（プロジェクトの開発方針）に関連する質問

【質問番号3-1】 Lesson-Learnedに基づく改善

【質問内容】

はやぶさ2に向けた改善は運用性の改善に基づくものと、はやぶさで発生した故障或いは不具合の反映によるものがあると思いますが、故障原因は全て明確になっているのでしょうか？必ずしも明確で無いケースがあるとすれば、故障発生防止のために複数の対策を採ることが重要と思いますがそのようなケースはありますか？

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 22ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

明確になっていないケースもありますが、考えられる原因に対して以下の表の通り対策します。

主要な故障	原因	「はやぶさ2」での対策
姿勢制御装置（リアクションホイール）が、3台中2台が故障した。	ホイール搭載位置の振動環境が厳しく、実績のある標準品が使えなかったため、ホイールに対し高振動対策の設計変更を実施したことが原因（メタルライナの剥がれ）。	<ul style="list-style-type: none"> <li>リアクションホイール対策として、メタルライナーを使用しない。</li> <li>標準品が使える振動環境となるよう、衛星システムの設計において搭載位置を検討する。</li> <li>偶発故障に備えて、ホイールの数を3個から4個に増やす。</li> </ul>
燃料漏れにより化学エンジンが使用不能となった。	バルブからの燃料漏れであることが特定されており、その原因については、バルブの気密性障害かバルブ駆動系への損傷であると考えられている。	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料漏れが発生したときの冗長性を強化するために、配管ルートを変更する。</li> <li>不測の着陸を防止するため、タッチダウン時の自律効用誘導制御アルゴリズムを見直す。</li> </ul>
イオンエンジンにおいてトラブルがあった。 (1)スラスタAの初期故障 (2)中和器のトラブル	(1)マイクロ波供給系の問題 (2)中和器の劣化による	<ul style="list-style-type: none"> <li>マイクロ波供給系の耐反射特性を改善する。</li> <li>中和器の耐スパッタ性改善による耐久性向上を行う。</li> </ul>

**【質問番号 3-2】 技術的意義の具体化について**

**【質問内容】**

資料 9 ページの「2. 技術的意義」について、説明内容が抽象的です。より具体的に、例えば、

- 1) 軌道計測時間を〇秒から△秒へ大幅に短縮した
- 2) ○○について、はやぶさ（1号）の技術を改良した。

の様に記述して下さい。資料の説明では内容が良く分かりません。

資料 10 ページの記述も同様です。ロバスト性、確実性、運用性とは何に対する指標で具体的な数値としてどのように「向上、成熟」させる（させた）のでしょうか。

全体にサイエンスの狙いや意義は詳しく書かれていますが、それを実現する技術内容は曖昧です。

**【資料の該当箇所】** 推進 1-1-3 9、10 ページ

**【回答者】** JAXA

**【回答内容】**

「はやぶさ」ではいくつかの不具合発生したため、小天体を往復して試料採取する探査技術を確立できた、とはまだ言えないと考えています。「はやぶさ」の技術を最大限に継承し、探査技術として確立することを「はやぶさ2」の意義・目的としています。

具体的な指標は「意義・目的」の章ではなく、「目標」に示しました（推進 1-1-3 16、17 ページ）。

どのように探査技術を確立するか、特に「はやぶさ」に対して何をどのように向上させるかは、21～22 ページに記しました。

「はやぶさ」では、例えば、リアクションホイールが故障し、ミッション遂行に大きな影響を与えました。これは、内部のメタルライナーの剥がれが原因と特定されたので、「はやぶさ2」のリアクションホイールにはメタルライナーを使用しないこと、また、偶発故障に備えてホイールを4台搭載し冗長性をもたせることで、ロバスト性、確実性を向上させます。その他の「はやぶさ」の教訓も同様に引き継ぎ、「はやぶさ2」の開発の中で検討・反映する計画です。

【質問番号 3-3】 目標について

【質問内容】

理学の部分は良く書かれていると思います。いわゆる、「新たな知見」を得ることを目標としており、サイエンスの進歩に大いに役立つことが理解できます。

一方、工学の部分では、例えば「対象天体にランデブー」するとありますが、これははやぶさ（1号）の技術そのままなのでしょうか、改良でしょうか、新規開発でしょうか。具体的な目標が書かれていません。その結果、リスク管理もどのレベルなのか分かりません。もう少し具体的に記載してください。

衝突体を使う手法についても、推進部会でご指摘があったかと思います。

全体に具体的な手段に関する記述が不足しています。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 16～18ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

資料の説明の仕方が少し不十分だったかと思いますが、「はやぶさ2」の場合には、「はやぶさ」の技術を最大限に継承することとしています（20ページ）。新規開発となりますのは、37ページに掲載されています①衝突装置、②近赤外分光計です。これら以外は、「はやぶさ」に搭載したものや、他で実績のある技術を使います。ただし、20～22ページに書かれていますように、必要に応じて改修します。

たとえば、ご質問の「対象天体にランデブー」ですが、これはイオンエンジンが中心的役割を果たします。イオンエンジンにつきましては、「はやぶさ」に搭載したものを改良して、問題点は改善する予定です。その他、化学エンジンや姿勢制御などについても、同様に対応します。これらは、「はやぶさ」で実績のあるものについて問題点を改善することになりますので、リスクは低いと考えています。具体的な改善点を以下の表に記します。

一方、衝突装置等の装置につきましては新規の開発ですので、先行して検討を進めています。十分に検討や試験を行うことでリスク低減をはかります。具体的な内容につきましては、トレードオフなどを継続して検討し、最終的には詳細設計までに決定します。

【質問番号 3-4】 「はやぶさ」ミッションからの教訓の取り込み

【質問内容】

p. 22 に「はやぶさ」ミッションからの教訓の取り込み（変更改善主要項目）が示されています。

参考までに、例えば、降下・着陸、サンプル採取に関して、「はやぶさ」の場合に對比して、) どのような変更改善を行う方針であるか、要約してご説明いただけませんか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ」ミッションからの教訓の取り組みは、プロジェクト内での研究会およびサブシステムの設計検討会議等で適時進めております。

ご質問の降下・着陸に関する変更改善項目として、

まず、降下・着陸に不可欠な姿勢制御用機器であるリアクションホイールの標準品の使用が可能となるような打ち上げ時の振動環境の確保と、運用でのホイールに対するロード条件の緩和の対策を施すと共に、その搭載数を3個から4個へ増加することによる冗長性の向上によって、信頼性の向上を図っております。更に位置制御用機器である化学スラスタに関しては、「はやぶさ」で発生した配管の故障対策を実施することによる信頼性の向上を図っております。更に、以下の技術項目について、重点的に変更改善を行っております。

- 小惑星の画像を用いた画像計測に基づく航法の自律化  
「はやぶさ」においては、小惑星表面の岩、穴といった目立つ箇所（特徴点）を抛り所として取得画像を地上のオペレータが解析して小惑星との相対位置を求め、その情報を基に接近・降下のコマンドを地上から送信することで探査機の位置を制御しておりました。往復の通信時間が30分以上必要であったことから、可能な限りこのプロセスを探査機搭載計算機による自律機能によって実現することを検討しております。
- 対象天体(1999JU3)の3次元形状・表面形状に対応した画像計測アルゴリズムの準備  
ご存知の通りイトカワは細長い形状で、その表面は大小様々な岩の多いゴツゴツした物でしたが、「はやぶさ2」がターゲットとする小惑星の形状は観測データから、比較的「丸い」形状であると予想されています。また、表面形状は小惑星近傍に探査機が到達して確認するまで未知数です。このように未知の3次元形状・表面形状に対応することを目的として、想定される条件に応じた画像計測アルゴリズムのセットを準備しております。
- 「はやぶさ2」で新たに追加となったオペレーションのための着陸精度向上策  
「はやぶさ」では周辺に比べて平坦で、ある程度の面積のある「ミューゼスの海」に着陸しましたが、「はやぶさ2」では衝突装置が小惑星表面に作ったクレータ内部、又は、周辺からのサンプリングを計画しております。また、1999JU3のサイズはイトカワの2倍、スピン周期はイトカワの12時間に比べ7~8時間と短いため、小惑星表面速度はイトカワよりも大きいと想定されております。このような条件下でのピンポイント着陸の為に、航法に使用するターゲットマーカの数の増加と、そのの

画像認識可能な高度域の拡張を検討していると共に、着陸の前の十分なリハーサル降下を可能にするべく搭載燃料の確保を図っております。

サンプル採取に関する変更改善項目としては、

- 確実にプロジェクティルが発射されるようにするための探査機の情報処理系の構成の検討
- より多くのサンプル採取のためのサンプリングの改修

を検討しております。

【質問番号 3-5】 「はやぶさ」のサンプルについて

【質問内容】

2010年6月に帰還したカプセル内のサンプルの分析作業の進捗について説明願います。

それによって得られた教訓をはやぶさ2の開発にどうやって活かすのでしょうか。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3

【回答者】 JAXA

【回答内容】

帰還カプセルは、相模原の惑星物質試料受入れ設備（キュレーション設備）で受入れており、サンプル収納容器の開封を終了しました。サンプル収納容器内の観察を開始したところですが、現時点の観察範囲はまだ一部に限られています。「はやぶさ」では当初予定していたプロジェクティル撃ちこみ方式でのサンプリングができていないことから、サンプル収納容器に捕獲されている小惑星表面物質のサイズは非常に小さいことが推測されています。このサイズでは、打ち上げ前の組立時や打ち上げ後の探査機内で混入した地球物質との区別がより重要となります。

従って、プロジェクティル撃ちこみ方式のサンプリングが確実に実施されるようにすること、採取されるサンプルが微小サイズになったとしても、十分な科学成果を上げられるようにすること、の2点が「はやぶさ」から得た大きな教訓です。

これを受けて、「はやぶさ2」では、プロジェクティル撃ちこみ方式のサンプリングが確実に実施されるように、サンプリングシーケンスの見直し等の対処を行います。また、微小サイズのサンプル分析も考慮します。例えば、サンプル採取容器の素材・表面処理・事前洗浄・組立環境等の改善検討を行うと同時に、小惑星表面物質以外の物質混入を防ぐ工夫の検討を行います。

プロジェクティル撃ちこみ方式のサンプリングでの収量を上げるためには、弾丸形状の変更や弾丸に加える回転が試料収量に与える効果をC型小惑星模擬試料に対して検討を行っています。また、大型試料採取を目的とする新規サンプリングデバイスとして、とりもち式サンプラーの検討も進めているところです。

【質問番号 3-6】 試料の解析について

【質問内容】

はやぶさ1についても、またははやぶさ2についても教えてください。

まず、実際に試料を持ち帰った後の科学的解析スキーム全般についての具体像。何をどこでどのように測定し何を求めるのか。固体、気体試料など、それぞれ何に着目しどのように誰がどこで測定しどのような結果を期待するのか。これら以外も含めて全体像をもう少し詳細に示してほしいと思います。

有機物や水などの測定は、宇宙の起源を知るといふ本科学的意義からはマイナーなことにもとれるかとも思いますので本筋を中心に教えてください。

また、試料を解析する上でははやぶさ1の問題点は何で(何と予想されるかでも結構です)それをはやぶさ2でどのように克服するのも合わせてお願いいたします。

【資料の該当箇所】 推進1-1-3 21ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

科学目標に関して：

「はやぶさ2」はビックバンの様な宇宙の起源を解明するミッションではなく、太陽系の起源を解明するミッションです。太陽系の起源は生命の起源にシームレスにつながっていきます。宇宙空間でできた簡単な有機物は生命材料となるような熟成した有機物に水と鉱物に囲まれた環境で化学進化していきます。「はやぶさ2」では生命の材料となりえた有機物が誕生直後の太陽系でどのように存在していたのか、その存在が惑星の材料となる鉱物、海の水となる氷とどのような関係をもっていたのかを解明することをめざします。太陽系に誕生した我々生命につながる第一歩の解明をめざすミッションとお考え下さい。

分析スキームに関して：

「はやぶさ」回収試料については、初期分析（1年程度）とその後の公募研究がおこなわれる予定です。初期分析では、

- ・ イトカワの表面固体物質の同定（FE-SEMによる組織観察、FE-EPMAによる元素組成分析、SIMSによる酸素同位体分析、TEMによる鉱物観察、放射光XRDによる鉱物同定、放射光CTによる構造観察など：東北大中村、茨城大野口、北大塚本、阪大土山、首都大海老原、岡山大中村など）
- ・ イトカワ起源気体分析（希ガス質量分析計：東大長尾、九大岡崎）、
- ・ 存在すればイトカワ起源有機物分析（九大奈良岡、九大北島）

などが予定されています。これらの初期分析および公募研究によって、イトカワ表面物質が反射スペクトルから推定された平衡LLコンドライトであるか、前世代天体での諸過程とイトカワへの集積過程（角礫化の有無、衝撃の程度など）、宇宙環境との相互作用（宇宙風化の実証、太陽風酸素同位体組成など）、小惑星表面へ降り注ぐ物質（例えば、地球上で汚染されていない有機物など）にどのようなものがあるか、といった太陽系初期に塵がつくられ、やがてイトカワのような小天体をつくるまでの進化の道筋に関する詳細な情報が得られることが期待されています。

「はやぶさ2」では、鉱物以外に有機物や氷関連物質（含水鉱物など）の採取をめざし、地球や海、生命の起源につながる第一歩の解明をめざします。分析内容は以下を考えています（分析の順番や比重については、採取された物質の量や鉱物、有機物、氷の存在割合によって変わります）。

1. 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（FE-SEM、FE-EPMA：東北大中村、茨城大野口、北大塚本・伊藤など）、プレソーラーグレイン種類・存在度、鉱物年代測定（SIMS：北大塚本・伊藤・坂本、阪大江端など）
2. 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（STXM、 $\mu$ -FTIR、中性子CT：阪大藪田、九大奈良岡、JAMSTEC高野など）、希ガス分析・担体同定（希ガス質量分析計、STXM、 $\mu$ -FTIR：九大岡崎、阪大藪田など）
3. 有機物 - 水相互作用：小惑星内部のアミノ酸（カルボン酸、糖）のキラリティー・分子・同位体組成（MALDI/TOF/MSなど：JAMSTEC高野、阪大藪田、九大奈良岡など）
4. 水-鉱物相互作用：小惑星氷、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（SIMS：北大塚本・伊藤・坂本、阪大江端など）、始源物質の水質変成作用の解明（FE-SEM、FE-EPMA、放射光XRD、TEM：東北大中村、茨城大野口、神戸大瀬戸、阪大土山など）
5. 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（SIMS：北大塚本・伊藤・坂本、阪大江端など）

#### 試料分析の問題点：

「はやぶさ」においては、採取資料が微量で小さいことが予想されるため、地球起源物質、人工物などの汚染物質からの分離が最大の問題と考えられます。「はやぶさ2」ではその教訓を活かし、（1）試料採取効率（量・サイズ）を上げる（打ち込み式試料回収方法の改良、とりもち式新規サンプリングデバイス開発）、（2）汚染を軽減する（カプセル封止方法改良、汚染防止蓋の追加）を実施、検討しております。「はやぶさ2」試料帰還時には分析技術（空間分解能、分析精度）は格段に向上が見込まれており、試料から抽出される情報の量・質は確実に上がります。



【質問番号 3-7】 サンプル回収法

【質問内容】

はやぶさ 2 ではサンプルリターンの成果がより強く求められると思いますが、回収方法はどのように改善される計画ですか？また回収箇所は 1 箇所のみですか？

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 22 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

サンプリングを確実に実施することが「はやぶさ 2」では重要となります。「はやぶさ」の教訓を受けて、以下の改善検討を進めています。

- ・ プロジェクティル撃ちこみ方式のサンプリングが確実に実施されるように、サンプリングシーケンスの見直し
- ・ プロジェクティル撃ちこみ方式のサンプリングでの収量を上げるために、弾丸形状の変更や弾丸に加える回転が試料収量に与える効果の検討（C型小惑星模擬試料に対して）
- ・ 大型試料採取を目的とする新規サンプリングデバイスとしてのとりもち式サンプラーの開発

試料採取は、衝突体を衝突させる前の小惑星表面から2箇所、衝突体によって形成されたクレータ内部または周辺部から1箇所、合計3箇所から採取することを検討しています。

## ● 評価項目 4（その他）に関連する質問

【質問番号 4-1】 搭載推進薬量

【質問内容】

28 ページには衛星の Wet 質量 600kg、Dry 質量 500kg となっているのに対し 32 ページでは化学推進薬容量 60kg、キセノン容量 80kg となっています。容量一杯推進薬を搭載した方がコンティンゲンシプラントしてはベターかと思いますが、推進薬搭載量を制限する理由は何ですか？

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 28、32 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

タンク容量としては、ご指摘の通りですが、これは「はやぶさ 1」で実績のある推進剤タンクをそのまま使用することによります。

「はやぶさ 2 で」、この容量にフルに推進剤を充填しない（する必要がない）理由は、以下の 2 点です。

(1) 「はやぶさ 1」では、イオンエンジンによる軌道制御自体が初めての試みであり、その運用性が完全に把握されていなかったため、イオンエンジンによる軌道制御を補正する目的での化学推進剤の使用を考えていました。しかし、実際にはイオンエンジンの運用性は十分によく、イオンエンジンによる軌道制御を化学推進系で補正する必要はほとんどありませんでした。またイオンエンジンにおいても、「はやぶさ 1」の運用性の実績を踏まえてマージンの取り方を精度よく見積もることができるようになりました。これにより、過剰な燃料マージンを省くことが可能となりました。

(2) 「はやぶさ 2」のシステム重量制約や、ロケットの打上げ能力というよりは、イオンエンジンの能力によって決まります。この点は往復探査（サンプルリターンミッション）が片道探査と大きく異なる点です。「はやぶさ 1」で実績のあるイオンエンジンを「はやぶさ 2」に搭載するのは前提ですから、打ち上げロケットの選び方によらず、地球に帰還させることのできる重量は決まります。その質量が 600kg ということです。

したがって、この質量を超えて燃料を充填することは、全体のミッションシナリオを不成立にします。Wet 総質量 600kg の範囲内で、「はやぶさ 2」のミッションシナリオ上必要な燃料重量は十分確保できるという認識です。

【質問番号 4-2】 「はやぶさ」 ミッションからの教訓 (P. 22) に関する質問 1

【質問内容】

リアクションホイールの事故は単に 3 個 → 4 個という冗長化だけでは解決できないと思われる。

使用条件 (例えば、打上時の衝撃対策、使用回転数等) を検討する必要は？

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 22 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ」のリアクションホイールの故障原因につきましては、平成18年8月31日の推進部会における報告のとおり、ホイール搭載位置の振動環境が厳しく、実績のある標準品が使えなかったため、ホイールに対し高振動対策の設計変更を実施したことが原因です(メタルライナの剥がれ)。

このため、「はやぶさ2」では、標準品が使える振動環境となるよう、ロケットの打上環境も考慮し(M-V⇒H-IIA)、衛星システムの設計に反映します。

上記により、リアクションホイール単体に対して確実な対策を施すとともに、ホイールを従来の3個から4個に増やすことにより、リアクションホイールの偶発故障対策に対する対応をいたします。

なお、御指摘いただいている使用回転数などのリアクションホイールの使用条件につきましては、今後の基本設計以降でリアクションホイールへのロード緩和条件を検討し、より確実な運用に反映するようにいたします。

【質問番号 4-3】 「はやぶさ」ミッションからの教訓 (P. 22) に関する質問 2

【質問内容】

電源系は冗長構成、短絡故障での波及抑止対策だけでなく、先ず一次不良の原因を徹底して検討すべき。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 22 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ」での問題は、探査機の姿勢喪失により太陽電池パドルが太陽指向から外れた続けたために、過放電が起こってしまい4つの電池のセルが使いえなくなってしまったことです。これまでの人工衛星や探査機の場合には、ニッカドないしニッケル水素電池を使っていましたので、多少の過放電に対しては耐性がありました。「はやぶさ」では、リチウム電池であったために、この点が問題になったわけです。「はやぶさ2」では、過放電防止機能を付けることを検討したいと考えています。

【質問番号 4-4】 観測機器に関する質問 1 (P. 33)

【質問内容】 (質問をご記入下さい)

地球帰還カプセルのアブレターの厚みと大気圏再突入角度の精度との関係を教えてください。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 33 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

アブレターの厚さを決定する重要なパラメータとして、最大加熱率（単位時間、単位面積辺りに入力するエネルギー）と、総加熱量（入熱総量であり、前項を時間積分したもの）があります。前者は主に表面損耗に効き、後者は熱分解の進行深さや、裏面（搭載機器側）の温度に影響を与えます。さて、突入速度が同じ場合、経路角が深いと最大加熱率が増え、総加熱量は減少し、経路角が浅い場合は、その逆になります。以上の前提を基に定性的に回答しますと、今回の「はやぶさ」の場合は、そもそも大きな表面損耗が発生しないという設計を施していますので、厚さ決定には、裏面温度の影響が大きいこととなります。経路角が浅くなると、総加熱量が増えるため、熱平衡する時点での温度は近似的には熱容量に反比例して高くなりますので、アブレターをその分だけ厚くすればよいということになりますが、重量の観点から得策ではありません。アブレターと機器の間に適切な厚さの断熱材（今回は白い綿状のもの）を貼付けることで、その温度上昇の時刻を遅らせることが可能になります。そして、内部温度が上がる前にアブレターを分離すればよいこととなります。「はやぶさ」では、最大加熱率の最大軌道、総加熱量の最大軌道、アブレター分離までの時刻最長軌道を想定して、熱防御系の設計をしました。

【質問番号 4-5】 小型惑星での重力

【質問内容】

小惑星での重力（はやぶさ 2 本体、及び小型ローバー）は如何ほどですか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 33 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ 2」の探査対象天体である 1999 JU3 については、地上からの観測でその大きさが  $0.922 \pm 0.048 \text{ km}$  と推定されています。また、形はいびつではありますが球形に近いと推定されています。ここでは簡単のため、1999 JU3 を半径が 460m の球であるとし、その密度はイトカワと同じ  $1.9 \text{ g/cm}^3$  であると仮定しますと、1999 JU3 の GM は、約  $51 \text{ m}^3/\text{s}^2$  と計算されます。

この値より、小惑星表面での重力加速度は、 $2.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$  となり、これは、1 万分の 2G (1G は  $9.8 \text{ m/s}^2$ ) ほどになります。これが小惑星表面に降りた小型ローバーにかかる重力です。一方、探査機については、そのホームポジションが小惑星から高度 20km の地点としますと、重力による加速度は  $1.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$  となります。探査機については、高度 20km から小惑星表面まで移動することになるので、上記の 2 つ値の間の加速度がかかることになります。

ちなみに、イトカワの場合には、GM の値が約  $2.3 \text{ m}^3/\text{s}^2$  であるので、中心から同じ距離のところで比較すると、1999 JU3 の場合の約 20 分の 1 の重力となっています。

【質問番号 4-6】 ミッション設計要求と技術開発項目について

【質問内容】

4. 8 技術開発項目に①～④が「はやぶさに搭載されていない」と記されています。  
4. 6 ミッション設計要求の結果、これら①～④が「必要」と判断したのだと思いますが、はやぶさになかったものは、既存技術の流用でしょうか、改良／新規開発でしょうか。

繰り返しになりますが、サイエンスミッションについては詳しく書かれていますが、それを実現するための手段について、何をどのような目的でどうしたのか、が資料からは読み取れません。JAXAが工夫した部分の説明をお願いします。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 33～34 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

「はやぶさ」になかった各機器についての状況は、次のようになります。いずれも実現性はあると判断しています。

	機器名	状況
①	衝突装置	宇宙用としては、世界でも前例はない。ただし、検討中の方式は、地上では既存の技術であり、これを宇宙用にするための検討を進めている。
②	Ka 通信系	日本の深宇宙探査機としては、まだ搭載された例はないが、実用衛星では実績があり、既存の技術である。
③	中間赤外カメラ	同様な機能のカメラが他科学衛星用にすでに開発されており、一部の変更で実現可能である。
④	近赤外分光計	「はやぶさ」にも近赤外分光計が搭載されていたので、一部のノウハウは使えるが、波長帯が異なるため、新規開発となる。世界的には、米国等で同様の機能を持つ観測装置が開発されている。

【質問番号 4 - 7】 観測機器に関する質問 2 (P. 33)

【質問内容】

近赤外分光計で計測される小惑星表面の分解能はどれくらいですか。  
又、目標地点はどれくらいの精度で特定できますか。

【資料の該当箇所】 推進 1 - 1 - 3 33 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

近赤外分光計の視野角が $0.1^\circ$ で、空間分解能は、通常の観測位置（高度20km）で35m、接近観測位置（高度約1km）で約2mになります。

目標地点の特定精度については、近赤外分光計の場合、視線方向を探査機座標系に対して固定とするため探査機の姿勢決定精度に依存します。探査機の姿勢決定精度の実績値は $0.01^\circ$ なので、視野の1/10程度の精度で分光計の観測領域を決めることができる見込みです。



【質問番号 4－8】 衝突体衝突による飛散物の影響

【質問内容】

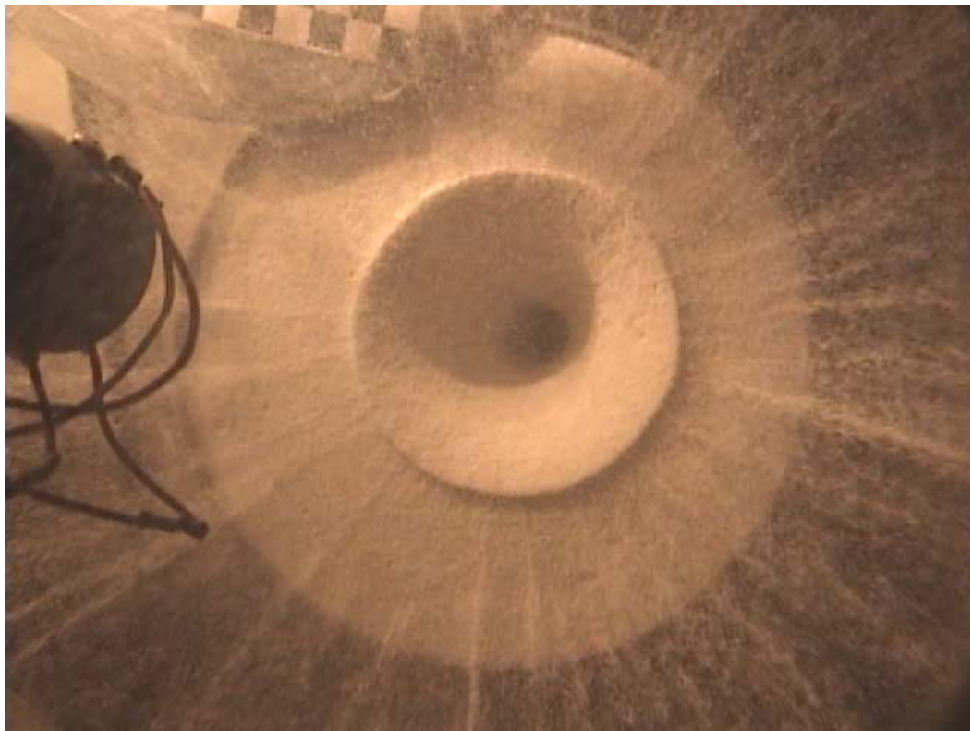
重力がほぼ0の環境下で小惑星に物体を衝突させた場合の飛散物の飛散状態は1G下の状態と大きく異なることは当然ですが、衛星本体に悪影響を与えないためにはどのような対策を採る計画ですか？またクレータがどのような形になるか確認方法はありますか？

【資料の該当箇所】 推進 1－1－3 15 ページ

【回答者】 JAXA

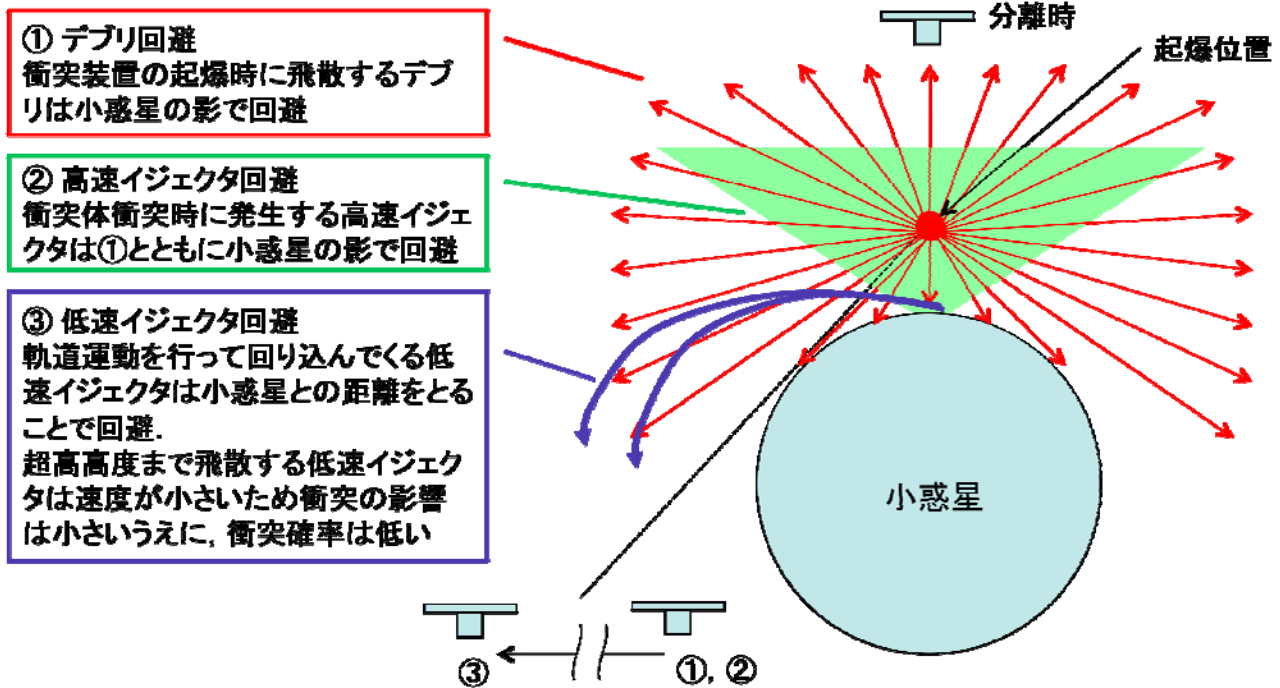
【回答内容】

微小重力下でのクレータ形成過程は、探査計画とは独立した理学研究テーマとしても重要であり、我々も岐阜県土岐市にあった日本無重量総合研究所（MGLAB）の落下塔を用いた実験を行ってきました。下図は、5 mm の鉄球（約510 mg）を 270 m/secで石英砂の標的に衝突させた実験の、衝突後1.0 秒の様子を示しています。直径約 90mm のクレータが形成され、イジェクタの飛散がつづいていることが見られます。このような実験から、微小重力下で形成されるクレータの形状も、地球上（1G）で形成されるクレータと大きな違いが無いことが判明しています。また、微小重力下で形成されるクレータの大きさに関する推定も可能となり、今回のインパクターの場合は、直径 4 m、深さ80 cm程度のクレータが形成されると推定されています。



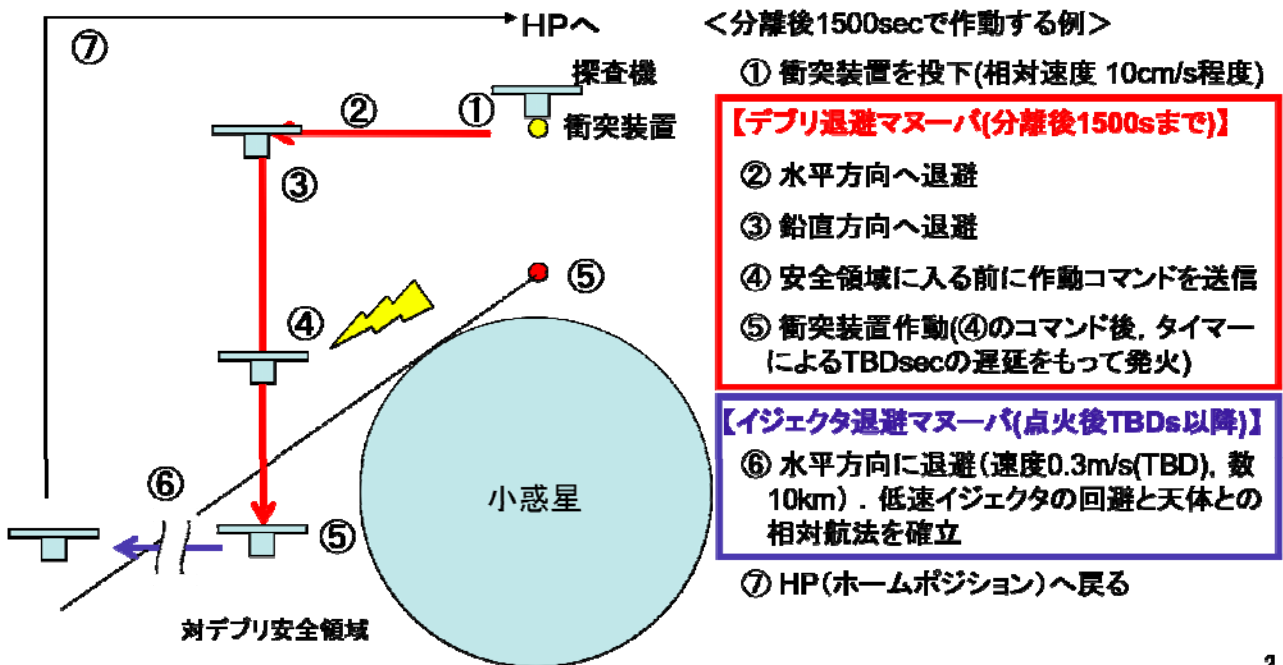
衝突時には衝突装置の破片及び衝突点からのイジェクタを回避する必要があります。探査機本体に悪影響を与えないようにするため、探査機は小惑星の陰に退避した後に発射するシーケンスを計画しています。詳細を以下の図に示します。

生成されたクレータ形状は、多バンド可視カメラ（光学カメラ）の画像を用いて、その直径及び深さなどを計測します。



1

衝突装置の起爆による飛散物(デブリ)と、クレーター生成時の小惑星からの飛散物(イジェクタ)の双方から着陸帰還機を守るため、以下の作動シーケンスを検討。



2

【質問番号 4-9】 インパクトの仕様について

【質問内容】

インパクトの仕様を示すこと。

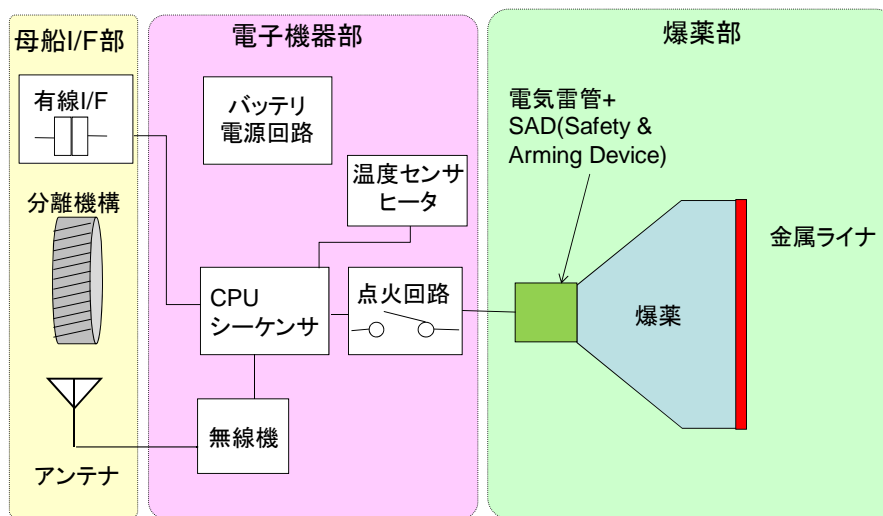
【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 15 ページ

【回答者】 J A X A

【回答内容】

衝突装置の機能ブロック図及び仕様を以下に示します。なお、概念設計段階であるため、仕様値は暫定となっています。

衝突装置ブロック図（機器名などは暫定）



衝突装置仕様（暫定）

- ・ 衝突体(ライナ)質量: 2kg
- ・ 衝突体速度: 2km/s
- ・ 爆薬部重量: 10kg (SAD含む)
- ・ 爆薬部径: 260mm
- ・ 爆薬部長さ: 190mm
- ・ 爆薬種類: HMX系PBX

【質問番号 4-10】 衝突装置

【質問内容】

先日のご説明では、秒速 2km で、8kg の銅を打ち込んで、人工クレータを形成するとありましたが、一般に成形弾は直径が小さく、より深い孔を開ける目的で開発された軍事目的のツールであり、鋼板、コンクリート等の硬い材料を対象としており、土砂、砂地には不適な方法と考えます。打ち込む地点の表面について、どのような状態を想定しているのでしょうか。

本計画は典型的な軍事技術の利用であるだけに、むしろ最初から、誤解を招かないよう、内容をオープンにしておいたほうが良いと考えます。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 15 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

まず、7月16日の部会における質問への口頭での回答に数値の誤りがありました。現在の検討では、衝突する衝突体（金属）の質量は 2 kg となっています。

標的となる小惑星表面に関しては、これまでの小惑星観測結果に基づき砂礫層（密度 1700 kg/m<sup>3</sup>、バルク音速 174 m/sec）<sup>(\*)</sup> を想定して検討を行っています。衝突速度が標的の音速に比べて十分に大きいので、衝突体の形状の影響は限定的であり、以下の金属球を使った室内でのクレータ形成実験の結果などが使えると考えています。

密度 8000 kg/m<sup>3</sup> の半径 3.9 cm の金属球（2 kg）が速度 2000 m/sec で上述の砂礫層に衝突した場合に形成されるクレータ直径 D・深さ d に関する三通りの推定を以下に記します。

(\*) 探査小惑星 1999 JU3 の物性はまだ不明なため、一般的な砂礫層の物性を想定

【1. 数値シミュレーションによる推定】

Autodyn (Lagrange, SPH) による計算から

**D = 2 m、d = 50 cm**

【2. 実験結果からの推定】

土岐の落下カプセル内で行った衝突実験

(Takagi et al., 2004、右図) の外挿式

$$E = 3.2 \times 10^4 D^{3.5}$$

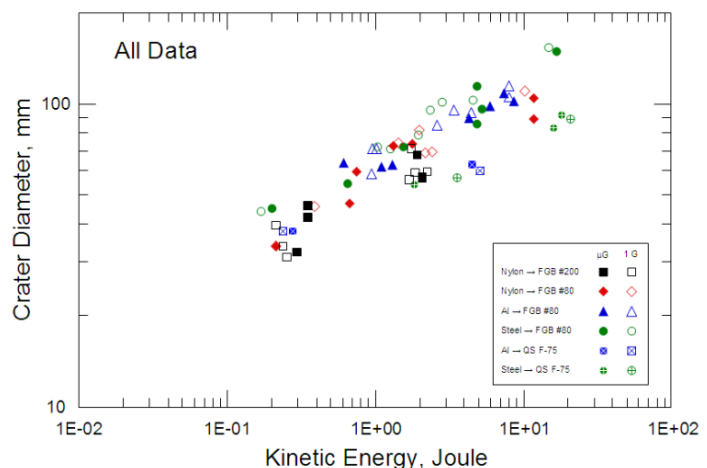
から、

**D = 4.0 m、d = 80 cm**

と推定される。(土岐の実験では深さのデータが得られていないので、多くの地上実験と同じ直径の 1/5 を仮定)

【3. 経験式による推定】

Holsapple & Housen (2007) による経験式



$$\frac{R_c}{r} = 1.03 \left( \frac{g r}{v_i^2} \right)^{-0.17} \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^{0.332}$$

ここで  $r$  はインパクト半径、 $g$  が表面重力、 $v_i$  が衝突速度、 $\delta$  がインパクト密度、 $\rho$  が標的密度である。1999 JU3 (直径 : 922 m) の場合は、 $g = 2.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$  から

**D = 7.4 m**

**d = 1.5 m** (Holsapple は深さに関する式を提示していないので、多くの地上実験と同じ直径の 1/5 を仮定) と推定される。

推定値に幅はありますが、母船搭載カメラの分解能 (10 cm @1 km) で十分に識別可能な大きさであり、誘導着陸精度からもサンプリング可能な大きさであり、表面の影響を受けていない深さに達していると考えられます。

なお、この衝突装置にもちいる技術の基礎は、軍事技術として成熟した実績が確立されていますが、「はやぶさ 2」では、その技術をベースにしつつ、独立に民間で開発いたします。新たな衝突装置は、剛性や密度が軍事技術での標的とは根本的に異なる小惑星に適するよう開発し、ライナーには試料分析に影響を与えない材質を新たに選定します。従って、逆に軍事技術に転用される可能性はほとんどないものになります。

【質問番号 4-11】 観測機器に関する質問 3 (P. 33)

【質問内容】 (質問をご記入下さい)

衝突装置について、8kg 位の金属を 2km/sec で打ち込むとの事ですが、その後、金属は中に埋まるのですか。それとも、跳ね返ってくるのですか。

【資料の該当箇所】 推進 1-1-3 33 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

標的となる小惑星表面は、砂礫層を仮定した検討を行っています。砂礫を標的に用いた地上での衝突実験の結果などからクレータ底に埋まると予測しています。

衝突した金属の小さな破片は、周辺に飛び散ります。クレータ内部または近辺からサンプル採取を行った場合は汚染 (コンタミ) 物質となることが予測されますので、隕石などの分析を行っている研究者の助言により、分析に最も影響の少ない銅を衝突する金属として選定することで、上記の問題を回避します。

なお、7月16日の部会における質問への口頭での回答に数値の誤りがありました。現在の検討では、衝突する弾丸 (金属) の質量は 2 kg となっています。