B1: 提案タイトル：

イトカワ再探査による宇宙衝突実験

B2:代表者：

荒川政彦・神戸大学 大学院理学研究科（masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp）探査経験 はやぶさ２(SCI PI)

B3: 共同提案者：

渡邊誠一郎・名古屋大学 大学院環境学研究科（seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp） 探査経験 なし

小林正規・千葉工業大学 惑星探査研究センター（kobayashi.masanori@it-chiba.ac.jp）探査経験 かぐや（ガンマ搭載線検出器）Co-I（機器開発、運用、データ解析)、ベピコロンボ搭載水星ダストモニターCo-I（機器開発、校正実験)、SELENE-2ローバー搭載LIB-S2 PI、SELENE-2オービター搭載ダストモニターLDM Sub-PI（仕様検討、機器開発)、はやぶさ２搭載LIDAR Co-I（校正実験、仕様検討）

和田浩二・千葉工業大学 惑星探査研究センター（wada@perc.it-chiba.ac.jp）探査経験 はやぶさ２(SCI Co-I)

田中 智・宇宙科学研究所（tanaka@planeta.sci.isas.jaxa.jp） 探査経験 Lunar-A (Penetrator)

白石浩章・宇宙科学研究所（siraisi@planeta.sci.isas.jaxa.jp） 探査経験 Lunar-A (Penetrator)

飯島祐一・宇宙科学研究所（iijima@planeta.sci.isas.jaxa.jp）探査経験 かぐや（ミッション取りまとめ、 CPU開発、衛星データ処理系担当、地上系運用計画系、データ処理システム担当） はやぶさ（サンプラーの開発､その他）のぞみ、Lunar－A（火星・月撮像カメラの開発、その他） SELENE２（ミッション取りまとめ、月面サバイバルシステムの開発）はやぶさ２（科学観測機器取りまとめ､その他）

小林直樹・宇宙科学研究所（kobayashi.naoki@jaxa.jp）探査経験 Lunar-A (Co-I), SELENE-2 (LBBS PI)

佐伯孝尚・宇宙科学研究所（saiki.takanao@jaxa.jp）探査経験 IKAROS, はやぶさ２(SCI PI)

本田理恵・高知大学・教育研究部（honda@is.kochi-u.ac.jp）探査経験　かぐや（ハイビジョンカメラ），LUNAR-A（月撮像カメラ担当）

門野敏彦・大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター（kadonot@ile.osaka-u.ac.jp）探査経験　はやぶさ２(SCI Sub-PI)

鈴木絢子・神戸大学・惑星科学研究センター（ayako@cps-jp.org）探査経験　なし

保井みなみ・神戸大学・自然科学系先端融合研究環　（minami.yasui@pearl.kobe-u.ac.jp）探査経験　なし

B4: 提案するミッションの概要（A4 一枚以内）

小惑星イトカワは，探査機はやぶさにより一度探査された天体であり，さらに表面試料を地球に持ち帰った唯一の小惑星である．はやぶさによる探査はこの小惑星に関して多くの科学的成果を挙げたが，同時にさらなる研究課題と探査の可能性を提示した．

このミッションは，一度探査したイトカワを再探査することにより，イトカワから得られる科学的知見をさらに深化させることを目的としている．再探査においては，すでに対象天体の基本的情報（表面地形，重力場等）を持っているので，探査計画の立案においては未知の天体とは大きく異なり，より具体的に探査対象に特化した観測機器を搭載することが可能である．さらに，一度目の探査から得られた成果をさらに発展させる探査計画や，新たにもたらされた疑問に答えるような問題解決型の探査計画の立案も可能である．例えば，イトカワでは表面粒子の運動が活発であることが予想されているので，はやぶさ探査との比較により，10 数年間の表面粒子流の運動を調べることが可能である．

今回提案するミッションは，この再探査のメリットを最大限に生かすために，イトカワ表面で宇宙衝突実験を行う．そして，小惑星環境での衝突物理の解明と衝突によるアクティブ探査を通した内部構造探査を実施する．

宇宙衝突実験は，はやぶさ 2 で開発されている SCI 改良型を用いて行う．イトカワの表面地形は既知であるのであらかじめ研究に最も適した衝突点を選定して，ピンポイントでの衝突実験が可能である．このために改良 SCI では姿勢制御機構を持ち，衝突精度を±10m にまで上げる．衝突物理の解明に関しては，ラブルパイル微小天体の衝突時の力学物性をモデル化するためにミューゼスの海へのクレーター形成実験を行う．このクレーター形成実験により，クレータースケール則における微小重力の効果を明らかにし，さらに，現実の小惑星表面におけるクレーター形成条件のアンカーを打つ．クレーターの研究には，その成長をその場観察する必要がある．そこで，観測用の子衛星を本体から分離運用してクレーターの成長の様子を子衛星に搭載した広角カメラ，望遠カメラ，ダストカウンター，ダストライダーにより観測する．

内部構造探査に関しては，改良 SCI を衝突させる以前に，月探査用ペネトレーターを小惑星用に改良したもの（小惑星ペネトレーター）をミューゼスの海に 10m/s 程度で衝突・設置させて，3 本のペネトレーターによる地震計ネットワークを事前に構築しておく．ペネトレーターの設置時には，搭載された加速度計により，小惑星表面に衝突貫入した時の抵抗力を計測し，表層を構成する小石層のモデル化に役立てる．改良 SCI の衝突により励起された弾性波をこれらの地震計で観測することにより，ミューゼスの海の内部構造や微小重力下での粉粒体に関する情報を取得する．この衝突による地震波内部構造探査を効率的に行うために，電波探査による内部構造のグローバルサーベイも実施する．また，イトカワを構成する岩石の物性は，地震波探査や電波探査の結果を解釈する上で極めて重要である．そのため，ミューゼスの海の cm サイズの小石を破壊せずに回収する試料サンプリングを行い，地球に持ち帰って物性測定を行う．

これからの実験データとクレーター形成実験の結果から，微小重力下の粉粒体の運動をモデル化し，仮想天体である微惑星の物理モデルを提案する．

B5: ミッションの科学目標および第一段パネル報告との関連

本ミッションの科学目標は，**仮想天体である微惑星の力学モデルの構築**である．そのためには，まず，微惑星アナログ天体上において宇宙衝突実験を行い，① 微小重力下でのクレーター スケール則の改良が必要である．これまでクレータースケール則の重力効果は，1G より大きな重力を与えた環境での実験結果を低重力側に外挿したもので議論されてきた．微小重力下でのクレーター形成実験も行われているが，その結果は，既存のスケール則とはかけ離れたものであり，その不一致の理由は謎である．微小天体でのクレーター形成実験は，地上では再現不可能な微小重力下で集積した構造への実験を可能にする．さらに，その形成に対する微小重力の効果を長時間の観測から精度良く調べることができる．従って，この微小天体上での実験は，今後の地上実験のアンカーとなることが期待され，極めて価値のある実験と言える．

アナログ天体としては，宇宙衝突実験を行うために必要な情報が既知であり，さらに微小重力ラブルパイル天体の典型である小惑星イトカワを選択する．微小重力ラブルパイル天体は，理論的に予測される微惑星（ダスト・アグリゲイトの重力集積天体）にその力学的性質が類似していると思われる．特にイトカワにはその中央部にミューゼスの海という小石が敷き詰められたような平坦な地形が広がっている．この平原において衝突実験を行いクレーター形成過程のその場観察を行い，クレータースケール則に対する微小重力の効果を明らかにする．

次に② 微小重力下にあるラブルパイル層の構造と力学的性質を明らかにする必要がある．ラブルパイル層の小石の中で，衝突点から遠いものは，衝突時にクレーターを形成するまでは運動しないが，局所的な衝突や摩擦，それに自分自身の振動・回転により，衝突エネルギーは散逸されていく．このようなラブルパイル層の微小重力下での運動を調べるために，改良 SCI の衝突を能動的震源とした地震波探査を行い，地震波の伝播・減衰を観測して，ラブルパイル層の地震波速度構造や減衰構造を明らかにする．また，小惑星ペネトレーターを 10m/s 程度でラブルパイル層に貫入させる実験を行い，その時にペネトレーターにかかった抵抗力（または，加速度）からも表層の力学構造を推定する．また，この衝突探査の結果は，主に衝突点近傍の構造や物性を反映すると思われるので，イトカワ全体の内部構造に関しては電波探査を行い内部の状態（均質なのか、小さな岩石と均質な砂、大きな岩塊の存在）の推定、1~10m 以上のサイズの岩石位置やサイズ分布を調査する．また，イトカワを構成する岩石の物性は，地震波探査や電波探査の結果を解釈する上で極めて重要である．そのため，ミューゼスの海の cm サイズの小石を破壊せずに回収する試料サンプリングを行い，地球に持ち帰って物性測定を行う．

最後に，外的擾乱による③ラブルパイル層の更新過程を明らかにする必要がある．実際に太陽系内で起こる様々な擾乱に対して，微小天体の表層，内部でどのような運動がおこるかを実証し，ブラジルナッツ効果に代表されるような構造形成過程を解明する．イトカワのような地球近傍小惑星では惑星接近時の潮汐により表面粒子層の運動が励起されることが指摘されている．また，微小隕石の衝突や静電浮遊・放射圧などの過程で表層粒子が定常的に攪拌／除去される可能性も指摘されている．そこで，はやぶさ２搭載カメラによるイトカワ表面の詳細撮像観測を行い，はやぶさ探査による撮像画像との比較を行う．特にミューゼスの海における 10 数年間の表面粒子層の運動を調べることで微小力下における粒子運動に関する知見を得る．

このようなイトカワ再探査を行うには，以下のような順序で観測・実験を実行する必要がある．

1． リモートセンシングによるグローバル観測：可視撮像と電波探査

２． ミューゼスの海における高解像度撮像観測.「はやぶさ」観測との比較観測
３． ペネトレーターの設置と地震波観測網の構築
４． SCI による衝突実験と小型衛星によるその場観測. ペネトレーターによる地震波観測. ダストライダーによるダスト観測
５． リモートセンシングによる衝突後の表面観測：可視撮像，電波探査
６． サンプルリターン

①，②，③の結果を用いて微惑星の力学モデルの構築を目指す.

このような小惑星再探査のミッションは，第１段パネルからの報告では，「2.発見段階から理解段階へ進むための同一小天体の再探査とそのための最適天体の検討」として、まとめられており，本ミッションはこの報告に沿ったものである.

２．惑星探査の長期展望から見たこの探査の位置づけ

小天体第一段パネルからの報告にあるように，今後の小惑星探査の中で月，火星等の大型天体と同様に再探査という可能性も排除することなく考慮すべきである．始めて来訪する小惑星は，常に新しい発見が期待され，その探査の科学的価値は高いが，着陸型の観測，試料採取においては，表面状態を事前に知ることができないという大きなリスクを背負うことになる．小惑星への再探査は，工学的試験衛星の意味合いの高い最初の探査を基礎にして，より発展・深化させ，理学的探査を成功させるための新しい提案である．小惑星探査では，リモセン探査を主としたパイロット探査とその結果を受けた本格的再探査をペアで行うことが試料採取や宇宙実験からの点でも望ましいと思われる.

一方，宇宙衝突実験は，小惑星のみならず，他の様々な天体上でトライすべき探査である．様々な重力，表面状態において実験を行えば，それぞれが，今後の室内実験におけるアンカーとなりえる．また，宇宙実験を行った天体表面では，クレーターの形成条件をより正確に読み解くことができるので，クレーター年代学への寄与も大きいと考えられる.

B6: 搭載観測器機の候補およびミッション科学目標との関連

１．ミッション科学目標「微小重力下でのクレータースケール則の改良」

このためには，以下の搭載機器が必要である.

- 改良 SCI（小型搭載型衝突装置）：2 台の SCI により異なる速度での衝突実験を実施する. 1km/s 以上の速度で 2kg 以上の弾丸を天体表層に精度±10m で衝突させる.
- 小型衛星：衝突クレーター形成のその場観測を行う．この小型衛星には，広角カメラ，望遠カメラ，ダストカウンターが搭載される.
    - 広角カメラ：成長するクレーターエジェクタの全体を撮像し，エジェクタ放出角度やエジェクタ総量の計測を行う.
    - 望遠カメラ：成長するクレーターリムやの中心部近傍のエジェクタカーテンのみを観測し，クレーターサイズや放出物の速度分布を決定する.
    - ダストカウンター：放出されるダストの速度と質量のフラックスを計測する.
        - ✧ この小型衛星からのその場観察で放出物の速度分布に関するスケール則を決定

する．さらに，放出物の観測からその総量やクレーターサイズの決定を試みる．

- 地形カメラ：探査機本体から小惑星表面の撮像を行う．衝突点付近の高解像度観測（<10cm/pixel）を衝突前前後に行い，衝突クレーターの同定とサイズの決定を行う．さらに，堆積したエジェクタの厚みを間接的手法で計測する．
- ダストライダー：探査機本体に搭載する。小型衛星に搭載するダストカウンターは点での観測だが、イジェクタがどのように小惑星上空を浮遊して広がっていく様子を観測するためには、大気中のエアロゾル（微粒子）を観測するためのエアロゾルライダー(レーザー光源と望遠鏡を組み合わせたレーザーレーダー)が有効だと考えている。衝突によって、ダストがどの程度小惑星の重力圏から流出して惑星間ダストになる割合を見積もる貴重なデータを得ることができるだろう。

２．ミッション科学目標「微小重力下にあるラブルパイル層の構造と力学的性質を明らかにする」

- 小惑星ペネトレーター：３台設置して地震計ネットワークを構築する．それぞれは内部に地震計と加速度計を搭載する．10m/s で射出して小惑星表面に突きさした時，その抵抗力を加速度計により観測する．さらに，改良 SCI 衝突時の地震波を計測し，地震波速度と減衰率の内部構造モデルを構築する．
- 電波探査レーダー：10MHz～500MHz（TBD）の周波数でのレーダー探査によりイトカワ全体の内部構造を調査する．反射波のプロファイルから岩石の分布状態、岩石サイズなどを推定する。
- 地形カメラ：衝突前後で，改良 SCI およびペネトレーターの衝突地点周囲を 1cm/pixel 以下の高解像度で撮影する．衝突前後の画像を比較することにより，表面の小石や礫の移動距離を計測する．そして衝突点からの距離とその場の小石の移動距離の相関から，弾性波の伝播・減衰に関する情報を得る．
- サンプラー：コア抜き方式によりミューゼスの海の cm サイズの小石を破壊することなく回収する．

３．ミッション科学目標「ラブルパイル層の更新過程を明らかにする」

- 地形カメラ：SCI の衝突前にはやぶさで撮像された地域（特にミューゼスの海）を重点的に<cm の空間分解能で高解像度撮像を行う．

B7: 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ

SCI（小型搭載型衝突装置）

- 衝突速度 1km/s 以上，質量 2kg 以上，命中精度±10m

小型衛星搭載カメラ

1. 広角カメラ：10fps，視野角 40°，空間分解能 0.5m/pixel@距離 1400m，撮影領域 1000x1000m
2. 望遠カメラ：30fps， 視野角 8°，空間分解能 10cm/pixel@距離 1400m，撮影領域 200x200m

ダストカウンター：粒径が約 1μm 以上、速度 10cm/s~1m/s のダストを検出する。惑星空間に飛び出たダストは太陽からの紫外線による光電効果や太陽風プラズマとの電荷交換によって、その表面は約+５V に帯電するので、平行平面の 2 枚のメッシュグリッドと電荷有感型アンプを組み合わせた検出器で静電誘導を利用してその電荷量を測定して質量に換算して、2 枚のメッシュグリッドを通過する時間から速度を求める。

ダストライダー： パルスレーザー光を上空に射出し、エアロゾル(浮遊微小粒子)等によって散乱されて、 地上に戻ってきた微弱な光を大型の望遠鏡と高感度センサを用いて検出する。図２に地上用エアロゾルライダーの例を示す。散乱光の偏光を調べると、ダスト粒子密度とサイズを判別することができる。粒径は、空間密度にもよるが、波長 1μm のレーザーを使うとレイリー散乱を利用して nm~数十 nm の粒径のものが、ミー散乱を利用して数十 nm から 10μm なの以上のものを観測することができる。光検出器の感度と光学系を適切に設計することで、空間密度が数個/cc 以上あれば数 km 離れたところでも十分ダストを検出できるので、探査機本体が安全な場所にいながら衝突後にイジェクタが広がっていく様子を観測することができる。基本的に空間的には一次元だが、探査機ごとあるいはジンバルに載せて角度を振ってやることで、三次元的なダストの分布の時間変化を調べることができる。

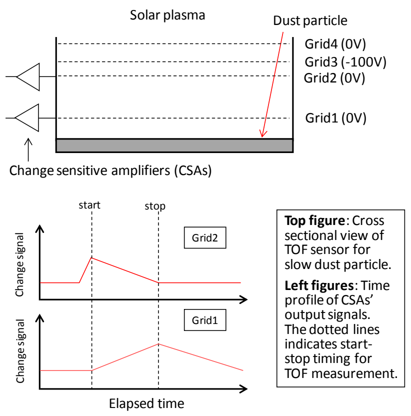

図１． 静電誘導型低速ダスト検出器

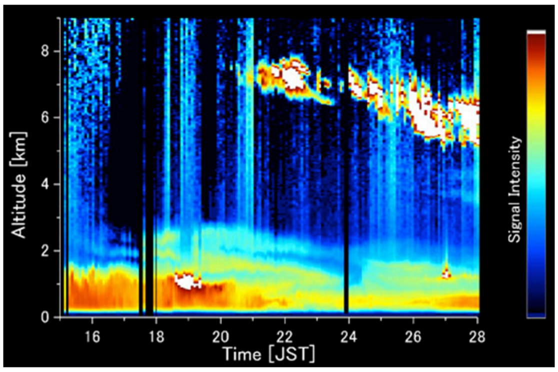

図２． 地上のエアロゾルライダーによるエアロゾルの空間分布データ。

地形カメラ：

- 広角カメラ: 視野角 60° ×60° , 1000pixel×1000pixel, 空間分解能 10cm/pixel@高度 100m, 7m/pixel @ 7km
- 望遠カメラ: 視野角 6° ×6° , 1000 pixel×1000pixel, 空間分解能 1cm/pixel@高度 100m , 0.7m/pixel @ 7km

電波探査レーダー：1m 以上の岩塊を識別，透過距離 ＞500m（10～500MHz、10W 出力（TBD）

ペネトレーター

- 本体：10m/s での砂地への衝突加速度に耐える構造，命中精度±10m 以下
- MEMS 加速度計：1 Hz-1 kHz, 10 nG/√Hz-1 kG/√Hz at 1 Hz (TBD)
- 地震計：MEMS 加速度計で代用（TBD）

サンプラー：cm サイズの小石を破壊せずに回収

B8: 想定する開発体制：メンバーリスト（役割と経験・能力（技能））

荒川政彦（カメラ，SCI 検討・室内実験用装置開発と実験の実施（衝突実験，変形実験））

渡邊誠一郎（ミッション統括・惑星形成理論の研究（天体力学の数値シミュレーション））

小林正規（ダストカウンターの開発，かぐや（ガンマ搭載線検出器）Co-I（機器開発、運用、データ解析）、ベピコロンボ搭載水星ダストモニターCo-I（機器開発、校正実験）、SELENE-2 ローバー搭載 LIB-S2　PI、SELENE-2 オービター搭載ダストモニターLDM　Sub-PI（仕様検討、機器開発）、はやぶさ２搭載 LIDAR Co-I（校正実験、仕様検討））

和田浩二（衝突の数値シミュレーション・DEM シュミレーション）

田中智（ペネトレーターの開発，Lunar-A（Penetrator）・ミッション機器開発）

白石浩章（ペネトレーターの開発，Lunar-A（Penetrator）・ミッション機器開発）

小林直樹（地震計システム（センサー，収録，送信，設置）・ペネトレータシステムの検討・開発，SELENE-2 LBBS PI・ミッション機器開発）

飯島祐一（カメラの開発，ミッション取りまとめ）経験、これまでの固体惑星関係の探査に全て参加している。ミッションの取りまとめ、探査機のシステム担当の経験もある。また臼田受信系、衛星管制、運用計画系など地上系整備も中心的に進めてきた。機器開発の経験も豊富で、カメラ、オンボードコンピュータなどの実績がある・ミッション取りまとめ）

佐伯孝尚（SCI 開発，IKAROS，はやぶさ２(SCI PI）・制御，ミッション機器開発）

本田理恵（カメラの開発・ミッション機器開発）

門野敏彦（カメラ，SCI 検討・室内実験用装置開発と実験の実施）

鈴木絢子（SCI 形成クレーターの検討・室内実験の実施）

保井みなみ（衝突励起地震波探査の検討・室内実験の実施）

電波探査レーダー担当者：未定

サンプラー・キュレーション担当者：未定

可能なメーカー：日本電気、住友重機、三菱重機、日本飛行機、明星電気、IHA など

B9: 実現に向けて必要となる技術課題

- SCI の命中精度をはやぶさ２の±200m から±10m に上げる
- 小惑星用のペネトレーターを開発する．耐衝撃加速度度は月仕様より低くて良い．できれば，小型化して搭載本数を増やす.
- 地震計・加速度計センサーの設置・固定方法

解決に必要なスケジュール：未定

必要な予算：未定

B10: 参考文献

特になし