

## 特集「月惑星探査の来たる10年：第二段階のまとめ」

## イトカワ再探査による宇宙衝突実験

荒川 政彦<sup>1</sup>，渡邊 誠一郎<sup>2</sup>，小林 正規<sup>3</sup>，和田 浩二<sup>3</sup>，  
田中 智<sup>4</sup>，白石 浩章<sup>4</sup>，飯島 祐一<sup>4</sup>，小林 直樹<sup>4</sup>，佐伯 孝尚<sup>4</sup>，  
本田 理恵<sup>5</sup>，門野 敏彦<sup>6</sup>，鈴木 絢子<sup>7</sup>，保井 みなみ<sup>8</sup>

2012年7月4日受領，2012年7月31日受理.

(要旨) 小惑星イトカワの再探査は，一度探査したイトカワを再び調査することにより，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．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じた内部構造探査を実施する．

## 1. 提案するミッションの概要

### 1.1 再探査の意義

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．

また，イトカワ自身も魅力ある天体である．イトカワは自己重力が $0.1 \text{ mm/s}^2$ と非常に小さいにもかかわらず，岩片が重力により堆積したラブルパイル構造を持っている．このように自己重力が小さいラブルパイル天体は，仮想天体である微惑星のアナログ天体としての価値がある．イトカワは，LL5やLL6普通コンドライトの母天体を起源とする天体であり，微惑星そのものではないのは明らかである．しかしながら，イトカワは，微惑星の持つ構造の中で最も未知な部分の一つである微小重力下で集積したアグリゲイトと同様な構造を持つことが予想される．従って，イトカワの内部構造を明らかにすることにより，仮想天体である微惑星の実像に迫ることができる．

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．イトカワはNEAであるので，3年に1回の打ち上げ機会がある．これから10年後くらいであれば，地球スウィングバイにより到達を目指すなら，2023年の打ち上げが一つのウィンドウとなる．一方，はや

1. 神戸大学大学院理学研究科  
2. 名古屋大学大学院環境学研究科  
3. 千葉工業大学惑星探査研究センター  
4. 宇宙科学研究所  
5. 高知大学自然科学系理学部門  
6. 産業医科大学医学部  
7. 神戸大学惑星科学研究センター  
8. 神戸大学自然科学系先端融合研究環  
masahiko.arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp

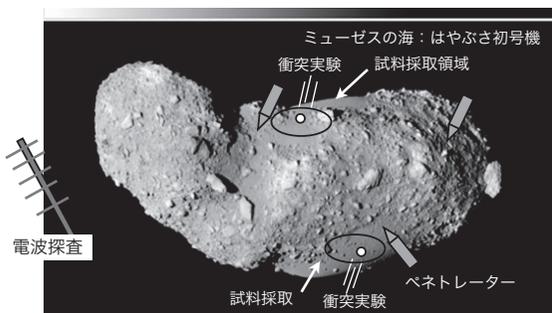


図1：イトカワ再探査による宇宙衝突実験のイメージ。Release 051101-2 ISAS/JAXAから改変。

ぶさは、当初の目的であった弾丸衝突による試料採取には成功しておらず、未だに微小重力下での衝突クレーターの形成やそのイジェクタを回収するという技術は実証されていない。さらに、イトカワでは安全にタッチダウンできる広い平坦な領域はミューゼスの海に限られている。もしも、複数地点でのタッチダウンを狙うならば、今後、探査機の姿勢制御技術を改善してタッチダウンの精度をあげる必要がある。

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(図1)。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じた内部構造探査を実施する。表面地形のマップや重力情報があるイトカワでは、表面にアクセスする必要がある観測や実験に関しては、その準備において大きなアドバンテージを持つ。特に衝突実験では衝突候補地点を事前に選択することが可能であり、標的条件に対応した衝突物理を明らかにする実験が可能である。

## 1.2 宇宙衝突実験

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。SCIとは、Small-Carry-on Impactor(小型搭載型衝突装置)の略で、質量2 kg程度の弾丸を速度2 km/sで打ち出す能力を持つ。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±10 m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。既存の衝突スケール則

を用いるとSCIの衝突により、直径10 m以上のクレーターが形成され、そのイジェクタは100 m以上にも広がる可能性がある。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。宇宙衝突実験では、地上実験のように複数回の実験を通して系統的にデータを取得することは難しく、実験は1点もしくは2点に限られる。しかしながら、この1, 2点の価値は極めて高く、地上実験や理論・シミュレーション研究において、微小重力の影響や小惑星物質における結果を外挿する上で、欠くことのできない参照データとなる。我々はこのような価値のあるデータをアンカーと呼ぶ。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、レーザー光の反射で観測する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10 m/s程度で衝突・設置して、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。

## 2. 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

### 2.1 本ミッションの科学目標

#### (1) 惑星形成論との関連

1970年代に創始された惑星形成理論は、1980年代には太陽系の惑星形成の標準モデルが完成した[1]。その後、天文観測や惑星探査により新しく発見される太陽系天体の特徴を説明するため、常に理論の見直しや改良が行われている[2]。この惑星形成理論と隕石から得られる物質科学的知見を統合して、太陽系形成の全貌を明らかにして行くためには、さらなる惑星形成理論の精密化が必要である。特に、微惑星から隕石母天体への衝突成長過程を再現するには、破壊過程が惑星集積に大きな影響を与えていることを考慮したモデルが必須である[3]。そのために、これまで室内実験を中心とした研究が行われ、その結果に基づいた衝突スケール則が構築されてきた[4]。そして現在もスケール則の拡張と改良が続けられている[5]。しかしながら、今までの研究にはスケール則を天体衝突に応用して行く上で3つの重大な問題点がある。それらは、①地上実験では実際の小惑星等の天体を構成する物質を用いていない、②微小重力下での実験例が少なく、その実験結果も食い違っている、③実験スケールがcmサイズに限られている、等の点である。ただし、③に関しては、現在、爆薬や核実験の結果を考慮して大スケールでの研究が行われている。この研究をさらに確固たるものにするためには、爆破エネルギーと衝突条件を関係づけることが必要であり、大スケールでの衝突実験がこの検証を可能とする。

我々は、この②、③の問題を克服して初めて衝突スケール則に対する重力とサイズ(衝突規模)の効果を明らかにすることができる。そして、微惑星(～km)から隕石母天体(～100 km)への衝突成長過程に関するより現実的な研究が可能となる。さらに、衝突スケール則を隕石母天体の衝突過程に応用するには①の問題を克服する必要がある。そのためには現実の隕石母天体の一部である小惑星の物性情報が必要である。小惑星表面で衝突実験を行うことができれば、地球上では取得が非常に難しい(①は決してできない)この3つの問題点を克服するための貴重な情報を取得できる可能

性がある。

イトカワ再探査による衝突実験は、サブkmサイズ天体の衝突過程をモデル化するために必要な衝突スケール則と天体の物性値を明らかにすることができる。衝突スケール則は惑星形成理論を精密化していく上で必須のツールであるので、惑星科学の発展においてインパクトのある探査であると考えられる。

#### (2) リターンサンプル

イトカワはリモセンとリターンサンプルの分析結果から、主にLLコンドライトからなる小惑星であることが確定している[6]。従って、リターンサンプルから宇宙化学的にインパクトのある情報を新たに取得することは難しい。一方、衝突スケール則を確立するという意味では、このLLコンドライトと思われる小惑星構成物質のバルク物性(密度、固さ、強度)が重要であり、cm、m、サブkmでの各スケールにおける情報が必要である。cmスケールのバルク物性、特にミクロ空隙率や強度はリターンサンプルの物性計測からのみ得ることができる情報であり、地球大気のセレクションを受けている隕石とは異なる結果が得られる可能性がある。地球で回収される隕石は、大気を通過する時の動圧に耐えるだけの強度を持っている。この強度は、母天体内部での強い続成作用や圧密・焼結作用に起因すると思われる。一方、微惑星から隕石母天体への進化を考えると天体表層ではこのような変成作用をほとんど受けていないレゴリス層や高空隙率層があった可能性が高い。従って、イトカワ表面の小石や岩塊には、このような地球大気のセレクションにより地上では回収できない母天体表面の低変成層の一部も入手できる可能性がある。一方、mサイズからサブkmのバルク物性は、衝突実験を震源とした地震波探査や電波探査等のその場観測により調べる必要がある。

次に、本ミッションで提案する3つの研究課題に関して説明する。

#### (3) 微小重力下でのクレータースケール則の改良

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、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。

#### (4) 微小重力下にあるラブルパイル層の構造と力学的性質

次に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10 m/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、1~10 m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。

#### (5) ラブルパイル層の更新過程

最後に、外的擾乱による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、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画像像との比較を行う。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重力下における粒子運動に関する知見を得る。

#### (6) 観測・実験の手順

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。

- (a) 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
- (b) 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
- (c) ペネトレーターの設置と地震波観測網の構築
- (d) 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
- (e) 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
- (f) サンプルリターン

(2), (3), (4)の結果を用いて衝突スケール則の構築とイトカワ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。

## 2.2 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。

イトカワ再探査は、イトカワの表層や内部構造を明らかにすることができる。この点は、今後の有人小惑星探査の候補天体を選出する上で極めて重要な評価基準となる。数少ない探査の機会を用いて、わざわざ既知の小惑星を再探査することは目新しさに欠け、理学探査としては必ずしも国民の支持を得られないかもしれない。しかしながら、理学探査に加えて今後の宇宙開発のマイルストーンとなるであろう有人小惑星探査を視野に入れると、イトカワ再探査は、次世代宇宙開発のワンステップとして国民の理解を得ることができるかもしれない。

### 3. 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

#### 3.1 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。

- (1) 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。1 km/s以上の速度で2 kg以上の弾丸を天体表層に精度 $\pm 10$  mで衝突させる。
- (2) 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。

- (a) 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。
  - (b) 望遠カメラ：成長するクレーターリムや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。
  - (c) 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。
- (3) 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(<10 cm/pixel)を衝突前後に行い、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。

- (4) 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、エジェクタが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ライダー)が有効だと考えている。衝突によって、ダストが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。

#### 3.2 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 にする」

このためには、以下の搭載機器が必要である。

- (5) 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。10 m/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。
- (6) 電波探査レーダー：10 MHz～500 MHz(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。

- (7) 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1 cm/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。
- (8) 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。

### 3.3 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」

このためには、以下の搭載機器が必要である。

- (9) 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。

## 4. まとめ

惑星探査の醍醐味は未踏天体の観測であり、初めて見る天体には必ず新しい発見があると誰もが考えている。そのため、数ある小惑星の中で一度行った小惑星を再訪して調査するよりは、これまで探査されたことのない新しい型の小惑星を狙った探査の方が魅力的である。確かに探査の主流であるリモセン観測に主眼をおくならば、この考えは妥当であると思われる。しかしながら、室内実験において同じ隕石を分析するのでも、分析手法が異なったり、分解能が飛躍的に高まった装置で分析すると、これまで見えてこなかった新しい世界が広がっていることが多々ある。小惑星探査においても、新しいリモセン機器やリモセン以外の観測装置を用いて探査を行うなら、再訪した小惑星でも新しい知見が得られて、新たな発見があると確信する。特に、表面に設置することが必要な装置に関しては、事前のパイロット探査により調べた表面情報がないと最適な観測装置を持ち込むことが不可能である。このような装置にとっては、再探査による観測が望ましいと言える。

一方、小惑星上での宇宙衝突実験は、室内実験では到底実現不可能な条件での実験を可能とし、貴重なデ

ータを取得することを可能にする。ただし、この宇宙衝突実験を成功させるためには、事前の準備が必要であり、特に小惑星の地形や表層状態に関する情報は必須である。このため宇宙衝突実験は、再探査と非常に良い親和性を持つ。我々は、イトカワ表面での宇宙衝突実験を通して、惑星形成論の精密化、特に微惑星から隕石母天体への衝突成長過程の研究に必要な衝突スケール則の改良を進めて行く。

## 参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and planets II, 1100.
- [2] Kokubo, E. and Ida, S., 2002, ApJ 581, 666.
- [3] Kobayashi, H. and Tanaka, H., 2010, Icarus 206, 735.
- [4] Holsapple, K. A., 1993, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 21, 333.
- [5] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., 2011, Icarus 211, 856.
- [6] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.