

## 小天体の特徴と探査の意義

### Characteristics and Significant Exploration of Small Solar System Bodies

三浦 保範<sup>1\*</sup>

Yasunori Miura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 客員 (国内外大学)

<sup>1</sup> Visiting (Universities)

太陽系小天体の特徴と探査の意義を下記のようにまとめる。

- 1) 太陽系小天体の特徴は、惑星の衝突成長時の基本的な構造組成を示す創成期の小天体物質である。
  - 2) 太陽系小天体は、古くから衝突で残存した固体物質であるので、気体・液体部分は消失し、ナノ物質固体相で創世などが付着して残存している。
  - 3) 太陽系小天体が、創成期の地表面に長く衝突し続けることにより、エジェクター放出中に軽元素(一部)を浅い内部に貫通し地下に(重力に抗して)保存する。それを回転潮汐力で上昇させて火山的に炭酸ガスの多いガス惑星(金星・火星)への供給源となりガス惑星を形成した。これは海洋圏が活動水圏地球でなくても、地下内部に軽元素を搬入する「衝突貫入(衝突成長)」過程により普遍的に可能である。
  - 4) 地球は太陽系(海水圏のない天体)に共通した軽元素運搬とは異なり、地球独自の三圏での気体・液体・固体圏内で循環するため、創成期の小天体や地球型惑星の世界では、(地球の形成過程は)変化しすぎて基本的に利用できない。
  - 5) 地球で形成された(マクロ)生命体の問題は、(液体循環のない)小天体では期待できない(ただし、水質変化物の残存する水惑星の破壊物の破片は除く)。これは生命体(人体では約7割が水分で、ミニ表面地球の物質状態のコピー活動体物質)の形成が、巨大海水圏の地球惑星で行われていることに依存するためである。
  - 6) 炭素含有有機物について、モノマー有機物はどんな条件でも(衝撃波照射があれば)形成し、生命体に重要な超分子と高分子有機炭素は、高温条件での持続反応が必要である。そのため、衝突過程のような迅速反応では、モノマーやオリゴマー(超分子)が形成できても、高分子形成と保存維持(マクロな時間)まではできないと考えられる。
  - 7) 宇宙空間や小天体で、衝突過程により、ガスが急冷で内蔵バブル(気泡や捕獲物質を持つ)ガラス固体を形成することが多い。内蔵したバブル状気体のミニ気泡(急冷サイズが減少)や捕獲物が高温で燃えてリム状堆積物のあるミニ気泡組織が形成された場合は、衝突ミニクレーターではなく、内蔵されたバブル気泡の組織を一面をみていると考えられる。
- 以上から、
- 1) 多数の小天体の探査をしても、炭素・水を含む有機物や生命体様物質(化石組織など)を探査するのであれば、その場分析より「サンプル回収」で行うのが最善である。現地では軽元素が抜けたりするので、ナノ組織を化学組成とともに確認するコンパクトな探査用開発マイクロ(ナノ観察)装置が開発されない限りは、確実に試料回収して地球の研究室で行う軽元素の分析観察が最善な選択であると考えられる。
  - 2) 有機物炭素の探査において、有機物モノマー分子は、衝撃波条件の照射があればどこでも出来るので、軽元素生成時の超分子・高分子の炭素の検出による起源の解明は、その場探査では(試料の時間・空間情報が不足しやすい知能ロボット式の探査であるため)非常に困難と考えられる(不可能でないが)。
  - 3) 以上から、今後の小惑星の小天体サンプルリターン科学における宇宙物質の解明の観点から、有意義な(日本的)探査の一つであるが、それを実現するための技術工学からのこれまで以上の支援がないと困難であると考えられる。

キーワード: 小天体, 特徴, 探査, 炭素と水, 生命有機物, ミニバブル組織

Keywords: Smaller bodies, Characteristics, Exploration, Carbon and water, Life organic compounds, Mini bubble texture

## 微小重力における粉体層への衝突の実験的研究：弾丸貫入の抵抗則 Laboratory Experiment on Impact Process of Granular Target under Microgravity: Drag Equation of Projectile Penetration

岡本 尚也<sup>1\*</sup>, ギュットラー カーステン<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, ハーゲマン ヤンヘンドリック<sup>2</sup>, 和田 浩二<sup>3</sup>, プリュム ユーリアン<sup>2</sup>  
Takaya Okamoto<sup>1\*</sup>, Carsten Guettler<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1</sup>, Jan-Hendrik Hagemann<sup>2</sup>, Koji Wada<sup>3</sup>, Jurgen Blum<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> ブラウンシュヴァイク工科大学, <sup>3</sup> 千葉工業大学 惑星探査研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Braunschweig University of Technology, <sup>3</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

小惑星はレゴリスやボルダーを表面に持つ。これらは衝突・再集積の進化の過程を経て表面に存在すると考えられる。例えば小惑星イトカワ上には破碎デブリから成っている smooth terrain とたくさんのボルダーが見られる rough terrain が観測されている。一方、イトカワの脱出速度は毎秒 10-20cm である。すなわち、脱出速度以下で再集積が起こると考えるならば、イトカワサイズの小惑星の再集積過程は  $\text{cm s}^{-1}$  -  $\text{m s}^{-1}$  オーダーの低速度衝突で起こったと考えられる。またイトカワ表面での重力、すなわち  $0.1\text{mm s}^{-2}$ 、といった微小重力におけるクレーター形成過程やイジェクタ放出過程の理解の確立は行われていない。本研究では、小惑星表層で起こったであろう再集積衝突過程を理解するために、小惑星レゴリスを模擬した粉体への低速度衝突実験を微小重力下で行った。本発表は天体表層のボルダーがどのようにレゴリスに貫入したかを理解するために、弾丸に働く抵抗則に焦点を絞る。

ターゲットには球形のガラスビーズと不規則形状の砂を使用した。ガラスビーズは  $90\text{-}106\ \mu\text{m}$  と  $355\text{-}500\ \mu\text{m}$ , 砂は  $100\text{-}180\ \mu\text{m}$  と  $300\text{-}600\ \mu\text{m}$  の粒子サイズを持つものを用意した。弾丸は直径 5mm, 長さ 15mm のアルミニウム円柱を加工して先端を半球形にしたものを用いた。実験はブラウンシュヴァイク工科大学 (ドイツ) のドロップタワーを使用した。この装置では弾丸とターゲット、高速度カメラを異なる時刻に自由落下させることで微小重力下 ( $< 3.4 \times 10^{-4}\ \text{m s}^{-2}$ ) で衝突実験を行うことができる (Beitz et al., 2011)。衝突速度は  $\sim 5\text{cm s}^{-1}$ ,  $23\text{cm s}^{-1}$ ,  $\sim 50\text{cm s}^{-1}$  の 3 通り、またチャンバー内圧力は  $\sim 20\ \text{Pa}$  と  $500\ \text{Pa}$  の 2 通りで行った。

砂への衝突ではイジェクタははっきりとしたコーン形状にはならなかったが、ガラスビーズへの衝突ではきれいなコーン形状のイジェクタが放出された。高速度カメラ画像から弾丸の後端とターゲット表面からの距離を測定して、弾丸の減速過程を解析した。その結果ガラスビーズよりも砂の方が減速されやすいことが分かった。初期解析として弾丸の受ける抵抗が速度の 2 乗に比例する場合、速度に比例する場合、速度に依らない定数の場合の 3 通りで弾丸減速の解析を行ったところ、速度に比例する抵抗を仮定した場合に最も良いフィッティング結果を得た。弾丸速度に比例する抵抗は、ガラスビーズ層へプラスチック球を初速度  $70\ \text{m s}^{-1}$  で打ち込んだ場合の実験および数値シミュレーションの解析結果にも見られる (Nakamura et al. 2013)。本発表では抵抗則がターゲット物質や粒径、衝突速度の違いをどのように反映するかについて議論する。

## 模擬小重力下での砂標的への衝突実験

### Experimental study on impact into sand under simulated reduced gravities

木内 真人<sup>1\*</sup>, 青木隆修<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>

Masato Kiuchi<sup>1\*</sup>, Aoki Takanobu<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kobe University

小惑星の表層の地形は衝突現象によってほぼ支配されており、表面の大部分はレゴリスによって覆われている。また、小惑星表面における重力加速度は非常に微小なものであるため、小惑星表面の進化の過程を考えるうえで、微小重力環境における衝突クレーターの形成を理解するのは重要である。

しかし、微小重力環境における衝突クレーター形成実験はあまり行われていない。数少ない実験例として、Gault and Wedekind (1977) は、標的を一定の力で引っ張るばねで吊るしながら落下させることで、標的にかかる重力加速度を変化させる実験を行った。この実験では、標的にかかる重力加速度を 1 G から 0.073 G までの間で衝突速度 0.4 ~ 8.0 km/s で石英砂に対する衝突実験を行っており、その結果、クレーター直径は表面重力の 0.165 乗に反比例することがわかっている。一方、Takagi et al. (2007) ではドロップタワーを用いた微小重力実験が行われている。この実験では、標的にかかる重力加速度が  $10^{-5}$  G 以下の環境下において、衝突速度 45 ~ 360 m/s で粒径 80 ~ 900  $\mu$  m のガラスビーズに対する衝突実験を行っている。その結果、微小重力下で形成されるクレーター直径と、1 G で形成されるクレーター直径では変化が見られず、Gault and Wedekind (1977) の結果と矛盾している。これらの結果の違いの理由は、実験データが少ないこともありよくわかっておらず、詳しく理解するためにはさらなる実験が必要である。

そこで我々は、標的を一定の力で引っ張るばねで吊るしながら落下させ、標的にかかる重力加速度を変化させた状態で低速度での衝突実験を行うこととした。予備実験では、標的に海砂 (粒径 ~ 100  $\mu$  m) を用い、容器につけたおもりの重さを変えることで、容器が落下する加速度を変化させた。また、容器に加速度センサをつけることで落下する加速度を計測し、標的にかかる重力加速度を算出したところ、加速度センサにより測定される値の精度は  $\pm 6 \times 10^{-3}$  G であった。

今後この落下装置を用いた衝突実験を行い、結果を報告する。

キーワード: 衝突実験, 微小重力, クレーター

Keywords: impact experiment, microgravity, crater

## 小惑星レゴリスに対するインパクターの破壊の程度 Fragmentation degree of impactor in collision with asteroid regolith

長岡 宏樹<sup>1\*</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 岡本 尚也<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>  
Hiroki Nagaoka<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Akiko<sup>1</sup>, OKAMOTO, Takaya<sup>1</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

はじめに: 多くの隕石は小惑星のかけらであり、コンドライト母天体は太陽系形成のごく初期に熱的活動を停止したと考えられるため、太陽系初期の情報を得られると考えられている。隕石は母天体ごとに、さらに化学組成ごとに分類されるが、様々な母天体由来と思われる岩片が混じっているものがある。これらの隕石は異なった天体由来の物質が破片として集まってできた角礫岩化したものであり、例えば、筑波隕石や Almahata Sitta 隕石には炭素質コンドライトの破片が含まれていることがわかっている (Nakashima et al. 2003, Jenniskens et al. 2009)。また、ベスタ起源だと考えられている HED 隕石には一般的に 5 vol. %の炭素質コンドライトが含まれており (Zolensky et al. 1996)、ベスタ表面上には炭素質コンドライトが衝突してできたと考えられるクレーターが存在している (Reddy et al. 2012)。このように他天体由来物質の破片を含んで角礫岩化した隕石は小惑星表面に存在するボルダーもしくはレゴリスに他天体由来のインパクターが衝突し、その破片がレゴリスと共に固化することによって形成されたと考えられている (e.g. Rubin et al. 1983)。加えて、イトカワの表面上に存在する約 6 m サイズのブラックボルダー (Hirata and Ishiguro 2011) も他天体由来の炭素質コンドライトかもしれない。これらの事から小惑星物質が他天体由来の物質を取り込むことは普遍的な現象であるだろう。

本研究において、まずはレゴリスに他天体由来の隕石が衝突したときの破壊の程度を実験的に調べることを目的として、弾丸の破壊の程度を調べた。

実験方法: 弾丸破壊を調べるために玄武岩を隕石模擬弾丸として小惑星のレゴリスを模擬したシリカサンドに撃ち込んだ。これまで衝突速度 167-960 m/s での実験を行ったが (長岡他、2012 年惑星科学会秋季講演会)、今回は弾丸の加速に宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用し、衝突速度は小惑星帯での平均衝突速度 4.4 km/s (Bottoke et al. 1994) を模擬する 2-5 km/s で実験を行った。弾丸破片は目開き 500  $\mu$  m のふるいを用いて回収した。

結果: 初期発生圧力を弾丸の引張強度で規格化した無次元衝突圧力と最大破片質量を元の弾丸質量で割った最大破片質量割合との関係を調べると、壊れ始めの圧力は弾丸の引張強度の 10 倍であり、約 200 MPa であることがわかった。また、今回の km/s オーダーでの衝突実験結果はこれまでの 100 m/s オーダーでの衝突実験から予想される最大破片質量割合よりも大きくなった。これは強度と歪速度の関係式  $(d/dt)^{3/(m+3)}$  m: ワイブルパラメータ (Grady and Kipp 1980) により、歪速度の増加に伴い弾丸の動的強度が大きくなったことが要因かもしれない。

キーワード: 小惑星, 隕石, 衝突

Keywords: asteroid, meteorite, impact

## 小惑星からのクレーター放出物の軌道解析 Numerical simulation on trajectories of crater ejecta from a small asteroid

満田智彦<sup>1</sup>, 平田 成<sup>1\*</sup>, 和田 浩二<sup>2</sup>, 千秋 博紀<sup>2</sup>, 矢野 創<sup>3</sup>, 荒川 政彦<sup>4</sup>  
MITSUTA, Tomohiko<sup>1</sup>, Naru Hirata<sup>1\*</sup>, Koji Wada<sup>2</sup>, Hiroki Senshu<sup>2</sup>, Hajime Yano<sup>3</sup>, Masahiko Arakawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 会津大学, <sup>2</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>4</sup> 神戸大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Univ. of Aizu, <sup>2</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>Institute of Space and Astronautical Science and JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exp, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Kobe University

小惑星探査機はやぶさ2計画には、探査機が運ぶ小型衝突装置を用いた人工クレーター形成実験の実施が含まれている。小天体上に形成されたクレーターからの放出物は、小惑星の重力場と太陽光の輻射圧を受けて複雑な挙動を示す。われわれは放出物軌道を追跡する数値シミュレーションを実施し、放出物のサイズ分布モデル、速度分布モデルと組み合わせ小惑星周囲の放出物量の時間変化を調べた。

キーワード: はやぶさ2, 1999JU3, 小惑星, クレーター, 放出物  
Keywords: Hayabusa 2, 1999JU3, asteroid, crater, ejecta

## はやぶさ 2 ONC-T を用いた隕石反射分光測定

### Reflectance spectroscopy of CM2 chondrite (Nogoya) using the Hayabusa2 ONC-T Flight Model

武井 亮斗<sup>1\*</sup>, 佐藤 允基<sup>1</sup>, 長勇 一郎<sup>2</sup>, 鈴木 秀彦<sup>1</sup>, 山田 学<sup>3</sup>, 亀田 真吾<sup>1</sup>, はやぶさ 2 ONC チーム<sup>4</sup>

TAKEI, Akito<sup>1\*</sup>, SATO, Masaki<sup>1</sup>, CHO, Yuitiro<sup>2</sup>, SUZUKI, Hidehiko<sup>1</sup>, YAMADA, Manabu<sup>3</sup>, KAMEDA, Shingo<sup>1</sup>, Hayabusa2 ONC team<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 立教大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 千葉工大, <sup>4</sup> 宇宙航空開発研究機構

<sup>1</sup>Rikkyo Univ., <sup>2</sup>Tokyo Univ., <sup>3</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>4</sup>JAXA

はやぶさは S 型小惑星イトカワからのサンプルリターンを成功させた。その技術を基に、はやぶさ 2 は C 型小惑星に分類されている 1999JU3 を目指す。S 型小惑星と C 型小惑星は熱変性度が異なる。C 型小惑星は熱変性が進んでおらず、含水鉱物や有機物を多く含んでいる可能性が示唆されている。はやぶさ 2 は、1999JU3 の表面にあると予想されている熱変性の進んでいない始原的な試料のサンプルリターンを目指す。

はやぶさ 2 ONC-T は、はやぶさに搭載された AMICA (Asteroid Multi-band Imaging Camera) と同様に 7 枚のフィルターと 1 枚のガラスからなるフィルタホイールを用いてマルチバンド分光を行う。AMICA に搭載されていた 430nm と 750nm のフィルターはそれぞれ 480nm と 589.5nm に変更されたので、はやぶさ 2 ONC-T のフィルタホイールは 390nm, 480nm, 550nm, 589.5nm, 700nm, 860nm, 950nm の 7 枚のフィルターと 1 枚のガラスを搭載する。1999JU3 の地上観測の結果から表面に含水鉱物の存在が示唆されるものの、小惑星の表面全域には分布していないと考えられる。そのため着陸する場所の選定は ONC-T によるマルチバンド分光撮像を行い、含水鉱物の存在を示す 700nm 付近の吸収特性の有無を見て行う。

本研究では ONC-T のフライトモデルを用いて炭素質隕石 Nogoya (CM2) の表面のマルチバンド分光撮像を行った。同じ条件で分光器を用いて行なった反射分光測定の結果と比較し、ONC-T による表面分光撮像観測から得られる科学成果について議論する。

キーワード: はやぶさ 2, ONC, 隕石, Nogoya

Keywords: Hayabusa2, ONC, meteorite, Nogoya

## はやぶさ2搭載近赤外分光計NIRS3の地上試験結果から期待される科学 Sciences prospected from the results of ground tests for NIRS3: the Near Infrared Spectrometer on Hayabusa-2

岩田 隆浩<sup>1\*</sup>, 北里 宏平<sup>2</sup>, 安部 正真<sup>1</sup>, 大竹 真紀子<sup>1</sup>, 松浦 周二<sup>1</sup>, 津村 耕司<sup>1</sup>, 仲内 悠祐<sup>3</sup>, 荒井 武彦<sup>4</sup>, 廣井 孝弘<sup>5</sup>, 千秋 博紀<sup>6</sup>, 小松 睦美<sup>7</sup>, 中村 智樹<sup>8</sup>, 渡邊 誠一郎<sup>9</sup>

Takahiro Iwata<sup>1\*</sup>, Kohei Kitazato<sup>2</sup>, Masanao Abe<sup>1</sup>, Makiko Ohtake<sup>1</sup>, Shuji Matsuura<sup>1</sup>, Koji Tsumura<sup>1</sup>, Yusuke Nakauchi<sup>3</sup>, Takehiko Arai<sup>4</sup>, Takahiro Hiroi<sup>5</sup>, Hiroki Senshu<sup>6</sup>, Mutsumi Komatsu<sup>7</sup>, Tomoki Nakamura<sup>8</sup>, Sei-ichiro WATANABE<sup>9</sup>

<sup>1</sup>JAXA 宇宙研, <sup>2</sup>会津大, <sup>3</sup>総研大, <sup>4</sup>国立天文台, <sup>5</sup>ブラウン大, <sup>6</sup>千葉工大, <sup>7</sup>早大高等研, <sup>8</sup>東北大, <sup>9</sup>名大

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>Univ. Aizu, <sup>3</sup>Graduate Univ. Advanced Studies, <sup>4</sup>NAOJ, <sup>5</sup>Brown Univ., <sup>6</sup>Chiba Inst. Tech., <sup>7</sup>Waseda Inst. Adv. Study, <sup>8</sup>Tohoku Univ., <sup>9</sup>Nagoya Univ.

近赤外分光計 (NIRS3) は、小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載され、1.8~3.2 ミクロン帯の近赤外波長域において小惑星表面からの太陽反射光及び熱放射を分光測定するリモートセンシング機器である。NIRS3の主要目的は、0.7 ミクロン帯で含水鉱物による吸収が見られたとされるC型小惑星1999JU3において、3 ミクロン帯でのOH基の対称伸縮振動や水分子の変角振動による吸収を検出し、小惑星表面における水・含水鉱物の分布状態を明らかにすることである。C型小惑星の素材ならびにその分布を調べることは、太陽系の初期進化の様子や地球の水の起源を解明する上で重要である。このため我々は、地球上の水による3 ミクロン帯の吸収の影響を受けないように、小惑星表面を直接観測する。含水鉱物の量を1~2 wt%の精度で推定するため、我々は2.6 ミクロン帯でのSN比が50を超えることを、NIRS3観測システムに対する設計要求とした。

NIRS3の詳細設計は2011年8月より開始し、NIRS3-S(センサ部)とNIRS3-AE(エレキ部)のエンジニアリングモデル(EM)を用いた地上性能試験や耐環境性試験、新規に開発したインジウムヒ素(InAs)検出器の性能試験、フライトモデル(FM)を用いた一次噛合試験棟を実施した。地上試験のうち総合SN比性能試験において、NIRS3観測システムの動作温度(197 K)でのSN比を測定したところ、積分時間が200マイクロ秒を超える時に暗電流が急増して、SN比を低下させていることが明らかになった。このため、(1)検出器温度温度の187 Kへの低下、(2)シャッタ開時刻中の複数回データ読み出し(マルチサンプリング)、(3)2チャンネル分のスペクトルのビニングを行うことによりSN比を満足させることとして、対策後の性能試験により有効性を確認した。一方、FM用InAs検出器の単体試験では、ノイズ特性が改善されていることが確認され(仲内他、本大会)、SN比が向上する見通しを得た。これらの地上試験の結果、NIRS3を用いたC形小惑星表面での、初期構成、水質変成、熱変成、宇宙風化に関して、新たな知見が得られることが期待される。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 1999JU3, NIRS3, 近赤外線, 分光計

Keywords: Hayabusa-2, asteroid, 1999JU3, NIRS3, near infrared, spectrometer

## はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRの開発と現状 Development of Thermal Infrared Imager onboard Hayabusa2

岡田 達明<sup>1\*</sup>, 福原 哲哉<sup>2</sup>, 田中 智<sup>1</sup>, 田口 真<sup>3</sup>, 荒井 武彦<sup>4</sup>, 千秋 博紀<sup>5</sup>, 小川 佳子<sup>6</sup>, 北里 宏平<sup>6</sup>, 出村 裕英<sup>6</sup>, 中村 良介<sup>8</sup>, 関口 朋彦<sup>9</sup>, 長谷川 直<sup>1</sup>, 今村 剛<sup>1</sup>, 松永 恒雄<sup>7</sup>, 和田 武彦<sup>1</sup>, 滝田 隼<sup>10</sup>, 坂谷 尚哉<sup>11</sup>, Helbert Jorn<sup>12</sup>, Mueller Thomas G.<sup>13</sup>, Hagermann Axel<sup>14</sup>

Tatsuaki Okada<sup>1\*</sup>, Tetsuya Fukuhara<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>1</sup>, Makoto Taguchi<sup>3</sup>, Takehiko Arai<sup>4</sup>, Hiroki Senshu<sup>5</sup>, Yoshiko Ogawa<sup>6</sup>, Kohei Kitazato<sup>6</sup>, Hirohide Demura<sup>6</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>8</sup>, Tomohiko Sekiguchi<sup>9</sup>, Sunao Hasegawa<sup>1</sup>, Takeshi Imamura<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>7</sup>, WADA, Takehiko<sup>1</sup>, Jun Takita<sup>10</sup>, Naoya Sakatani<sup>11</sup>, HELBERT, Joern<sup>12</sup>, MUELLER, Thomas G.<sup>13</sup>, HAGERMANN, Axel<sup>14</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 北海道大学, <sup>3</sup> 立教大学, <sup>4</sup> 国立天文台, <sup>5</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>6</sup> 会津大学, <sup>7</sup> 産業総合研究所, <sup>8</sup> 北海道教育大学, <sup>9</sup> 国立環境研究所, <sup>10</sup> 東京大学, <sup>11</sup> 総合研究大学院大学, <sup>12</sup> ドイツ航空宇宙研究センター, <sup>13</sup> マックスプランク地球外物理学研究所, <sup>14</sup> オープン大学

<sup>1</sup>Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, <sup>2</sup>Hokkaido University, <sup>3</sup>Rikkyo University, <sup>4</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>5</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, <sup>6</sup>University of Aizu, <sup>7</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>8</sup>Hokkaido University of Education, <sup>9</sup>National Institute for Environmental Studies, <sup>10</sup>University of Tokyo, <sup>11</sup>Graduate University for Advanced Studies, <sup>12</sup>German Aerospace Center, <sup>13</sup>Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, <sup>14</sup>Open University

中間赤外カメラ (TIR) は小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載され、近地球型C型小惑星 1999JU3 の熱撮像を行う装置である。本機器は2次元非冷却ボロメータを搭載し、小惑星表面からの熱放射を8~12ミクロンの単バンドで撮像する。視野角  $16^\circ \times 12^\circ$ 、画素解像度は  $0.05^\circ$ 、有効画素数は  $320 \times 240$  である。小惑星から距離20km離れたホームポジションから、小惑星 1999JU3 の全体が視野内に入り、画素解像度が約20mである。熱放射量は小惑星の表面温度と熱光学特性 (熱放射率、可視光反射率) で決定される。当該波長域でのC型小惑星の熱放射率はほぼ炭素質コンドライト隕石で代表できると考えられ、 $0.96 \pm 0.02$  程度であるため熱放射率による依存性は小さく、表面の絶対温度が  $\pm 2$  の誤差で決定される。熱慣性は熱容量と熱伝導率で決まる物理量である。岩の場合は空隙に依存し、多孔質岩石では空隙が増えるほど熱容量が減り、また断面積の縮小により熱の伝導が制限されるため、表層の温度変動幅が大きくなる。表層のみのため時間応答も早くなる。一方で空隙が減るほど熱容量の増大と内部への熱伝導増加によって表層温度の変動幅が縮小し、時間応答が長くなる。砂利や砂礫の場合は空隙率に加えて粒径が小さいほど熱伝達効率が低下する。これらの結果として、細粒ではSI単位系で熱慣性は100以下、ミリメートルサイズの砂だと100~200、センチメートルサイズだと200~400などと上昇する。岩盤については、多孔質で1000~2000、稠密な岩石で2000以上となる。

小惑星上での温度変動幅は、表層の熱慣性と小惑星の自転速度や地理緯度によって変わる。小惑星の1自転中に複数枚撮像して各地点の温度履歴を調べることによって、小惑星の太陽距離、地理緯度から期待される温度変動幅、最高温度到達時刻の南中時からの時間遅れによって、各地点の熱慣性を決定することができる。これまで撮像された小惑星はそれぞれ多様な特徴を示すが、1999JU3も同様と考えられる。表層に点在する岩塊が多孔質であるか稠密な岩盤であるかは揮発性物質とともに形成された天体の圧密状態を示す指標であるが、熱慣性が決定できれば推測が可能である。平原やポンドなど堆積地形では、表層レゴリスの典型的粒径やその地域分布を熱慣性から調べ、ることで、粒子流動や堆積過程について調べることができる。クレータ内部の観察によって天体内部を直接探査できるが、ラブルパイル的に岩塊の集合体であるか、低圧密状態のレゴリス層が深くまで存在するかを熱慣性により確認することができる。その他、地上観測から推定された小惑星の熱モデルと実際的小惑星の熱物性分布を比較することによって、地上観測で得られた小惑星直径と熱慣性の関係、表層凹凸と熱放射強度の角度依存性など、熱モデルを評価し、信頼度の向上につなげられると期待する。

TIRは「あかつき」搭載LIRと同設計品であるが、搭載環境や目標観測対象温度、および機上処理用デジタルエレキの仕様は異なる。TIRのフライトモデルを製作し、試験・評価を進めている。2012年11月から2013年1月までPMを用いて機械環境サーベイ試験に参加し、探査機搭載条件での音響・衝撃耐性を確認した。熱解析については小惑星へのタッチダウン条件などでの熱モデル評価を実施しており、問題ないことを確認している。2013年1月から2月にはボロメータを搭載して特殊なパターンのターゲットを利用して、焦点位置の調整を実施した。2013年2月以降には一次噛合試験において、デジタルエレキとの噛合せやコマンド・テレメトリ試験等の電気試験を進めている。観測プログラム等による自動観測モードの試験については今後進めてゆく。一次噛合試験後には、TIR単体での機械・熱環境試験や、性能評価・校正試験を実施する予定である。現在、性能評価・校正試験用の試験環境の構築を進めている。本発表ではTIRの開発の現状を報告する。



# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



U07-08

会場:105

時間:5月19日 11:45-12:00

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 熱慣性, 表層進化過程, 熱放射, 温度

Keywords: Hayabusa2, asteroid, thermal inertia, planetary surface process, thermal emission, temperature

## 「はやぶさ2」熱赤外カメラによる小惑星の熱慣性測定シミュレーション Simulation of thermal inertia measurement of an asteroid by Thermal Infrared Camera onboard HAYABUSA 2

田口 真<sup>1\*</sup>, 山口璃恵<sup>1</sup>

Makoto Taguchi<sup>1\*</sup>, Rie Yamaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 立教大学

<sup>1</sup>Rikkyo University

2014年に打ち上げ予定の小惑星探査機「はやぶさ2」は太陽系形成初期状態を記憶しているとされるC型小惑星「1999JU3」を観測対象としている。「はやぶさ2」の観測目標の1つとして、小惑星の熱慣性を調べることで、小惑星自身の表面物性及び内部構造を推定するということがあげられる。本研究では、「はやぶさ2」に搭載される熱赤外カメラ Thermal Infrared Camera (TIR) による小惑星表面の観測を模擬する室内実験を行った。民生用赤外線カメラを用いて砂岩(長石質)を岩、砂利、砂の形状に加工した3種類の観測対象の表面温度を観測し、その温度時間変化から導出した熱慣性の測定精度を議論する。各観測物体のアルベド、光源として使用したハロゲンランプの放射照度は分光器で測定された。これと、赤外線カメラで撮像した各観測物体及び2枚のアルミ板のグレーレベルと熱電対を通して得られたアルミ板の温度から求めた砂岩の表面温度から熱慣性を導いた。この実験において、観測物体から見て光源と赤外線カメラのなす角が約10°と約45°の2方向についてデータを取得した。その結果、同じ物性の鉱物でも、形状が異なると熱慣性値は異なり、砂、砂利、岩の順に大きくなった。堆積した鉱物の空隙率が大きいほど、小惑星表面から内部に熱を伝えにくくなるので、熱慣性は小さくなる。「はやぶさ2」TIRは小惑星の自転による表面温度変化の計測結果から熱慣性を導出し、表面物性の推測が可能であることがわかった。

## はやぶさ2 LIDARを用いたダスト観測 Detection of dust around 1999JU3 using Hayabusa-2 LIDAR

千秋 博紀<sup>1\*</sup>, 小林 正規<sup>1</sup>, 服部 真季<sup>2</sup>, 押上 祥子<sup>3</sup>, 並木 則行<sup>1</sup>, 水野 貴秀<sup>4</sup>, LIDARサイエンスグループ<sup>1</sup>  
Hiroki Senshu<sup>1\*</sup>, Masanori Kobayashi<sup>1</sup>, Maki Hattori<sup>2</sup>, Shoko Oshigami<sup>3</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Takahide Mizuno<sup>4</sup>, Hayabusa-2  
LIDAR Science group<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科, <sup>3</sup> 国立天文台水沢, <sup>4</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>PERC/ Chitech, <sup>2</sup>Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>4</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

The surface of an airless object suffers from bombardments of micrometeoroids. The bombardments produce small fragments, or dust grains, on and around the surface of the object. Dust grains on the surface could be ejected from the surface due to some reasons such as seismic shaking, another impact, electric repulsion, etc. Lateral transport of dust particles at the surface of the object is likely very important for formation of local morphology. Also, vertical transport of dust is critical for interpretation of irradiation age of cometary rays and implantation of solar wind elements which could constrain orbital evolution of the object. We are planning to detect dusts around the target object of Hayabusa-2 mission, 1999JU3, by using Hayabusa-2 LIDAR.

Hayabusa-2 LIDAR is one of four remote sensing instruments onboard Hayabusa-2. It measures distance between the spacecraft and a target by taking a time of flight of LASER pulse. The threshold level in optical receiver changes in 8 steps. Dust grains with radius of ten micrometers and spatial density of a few grains per cc is expected to be detected from an altitude of 20km (Hayabusa-2 home position), but it depends not only on the physical properties of dust grains but also on sensitivity of receivers for faint signal. Thus we need to verify the performance of dust detection mode of Hayabusa-2 LIDAR.

We develop a new device which simulates a faint reflected light from dust clouds. When a trigger signal is received, it irradiates LASER with a pre-programmed pattern. The time resolution of the pattern is ten nanoseconds and energy changes in 7 steps. The maximum energy of LASER is adjusted by using ND-filter.

In this presentation we will present a strategy to verify the performance of dust detection mode of Hayabusa-2 LIDAR, and discuss the possibility of dust detection around 1999JU3.

キーワード: ダスト, LIDAR, はやぶさ2  
Keywords: dust, LIDAR, Hayabusa-2

## 小天体探査の工学的側面：はやぶさ2と将来計画 Engineering Aspect of Small Body Exploration -Hayabusa2 and Future

津田 雄一<sup>1\*</sup>  
Yuichi Tsuda<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
<sup>1</sup>ISAS/JAXA

The second asteroid sample return mission "Hayabusa-2" is now under development. It is to be launched in the end of 2014 to set out on a round-trip voyage for a C-type asteroid 1999 JU3. The Hayabusa2 mission is regarded as a series of the Japanese programmatic exploration of small body. In order to stably and strongly evolve our small body explorations, the best blend of new technologies and heritage-based technology should always be pursued. This talk reviews the mission scenario of Hayabusa2; what are mission enablers and what are technological challenges in it, and then discusses several future strawman missions than can be realized with our present and near-future engineering capabilities.

Keywords: Planetary Exploration, Spacecraft, Asteroid, Sample Return

## Hayabusa-2 衝突実験観測用カメラ DCAM3 の開発状況 Development Status of Hayabusa-2 Deployable Camera (DCAM3)

小川 和律<sup>1\*</sup>, 荒川 政彦<sup>2</sup>, 飯島 祐一<sup>1</sup>, 白井 慶<sup>1</sup>, 和田 浩二<sup>3</sup>, 本田 理恵<sup>4</sup>, 澤田 弘崇<sup>1</sup>, 石橋 高<sup>3</sup>, 坂谷 尚哉<sup>5</sup>, 門野 敏彦<sup>6</sup>, 中澤 暁<sup>1</sup>, 小林 正規<sup>3</sup>, 早川 基<sup>1</sup>

Kazunori Ogawa<sup>1\*</sup>, Masahiko Arakawa<sup>2</sup>, Yuichi Iijima<sup>1</sup>, Kei Shirai<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>3</sup>, Rie Honda<sup>4</sup>, Sawada Hiroataka<sup>1</sup>, Ko Ishibashi<sup>3</sup>, Naoya Sakatani<sup>5</sup>, Toshihiko Kadono<sup>6</sup>, Satoru Nakazawa<sup>1</sup>, Masanori Kobayashi<sup>3</sup>, Hajime Hayakawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 神戸大学, <sup>3</sup> 千葉工業大学, <sup>4</sup> 高知大学, <sup>5</sup> 総合研究大学院大学, <sup>6</sup> 産業医科大学

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>Kobe University, <sup>3</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>4</sup>Kochi University, <sup>5</sup>The Graduate University for Advanced Studies, <sup>6</sup>University of Occupational and Environmental Health

微惑星から惑星への成長過程において衝突は最も重要な物理プロセスである。現在太陽系に存在する小惑星は、より大きな天体への集積の途中か、成長した天体の破片(もしくは、その集合体のラブルパイル)であると考えられ、惑星集積過程の情報を残す化石であると見ることが出来る。小惑星の衝突現象を明らかにすることは、小惑星の衝突合体や破壊に関する衝突のスケール則の構築を通して、実際の惑星集積過程を推定するために不可欠である。

小惑星上における衝突現象の理解のため、Hayabusa-2 では SCI (Small Carry-on Impactor) と呼ぶ弾丸発射装置を用いて、対象天体である小惑星 1999JU3 上で天体衝突を模擬することを計画している。SCI は母船から分離した後の一定時間後に推進装置が起動する。これにより底面の銅盤が球殻状に変形しながら約 2 km/s まで加速され、小惑星に衝突する。これを観測することで微小重力下での衝突プロセスを明らかにし、また同時に表層構造の推定を行う。この SCI 衝突時の観測のために、母船から分離して可視光撮像を行うカメラ (DCAM3) を開発している。これはソーラーセイルミッション IKAROS で開発された分離カメラ DCAM をベースとするもので、分離カメラの筐体サイズは直径・長さともに約 80 mm 程度の小型機器である。Hayabusa-2 では、SCI 衝突時のイジェクタやデブリに衝突しないよう母船が安全区域へ回避している。分離カメラは、その際、衝突点の近傍 500 m 程度の位置に残って衝突の様子を観測し、データを母船に無線通信で送る。

DCAM3 は内部に DCAM3-A と DCAM3-D の独立した 2 系統のカメラを持ち、それぞれ母船へ撮像データを送信する。DCAM3-A は主に衝突実験のモニタ用として撮像データをリアルタイムに送信する機能を持つ。対して理学的観測は、空間分解能が高く広角視野を持つ DCAM3-D が主に担当する。DCAM3-D の理学目標は (1) 1999JU3 の表面構造の推定、(2) 特に微小重力下における衝突スケール則の構築である。これら目標のためには、衝突時のイジェクタ、生成されたクレータ、SCI 爆破位置 (衝突角度) を詳細に観測することが必要となる。特にイジェクタについては、時間とともに広がるイジェクタカーテンのサイズと角度、広がり速度が重要な情報であり、これらを決定できる空間・時間分解能が求められる。また、衝突後数時間で DCAM3 近傍に飛来する低速のイジェクタ (ダスト) についても観測を行う。

DCAM3-D の開発としてこれまで、概念検討・設計より始めて試作モデル製作・検証試験を実施してきた。現在はフライトモデルの機能・性能評価試験を開始している。DCAM3-D のセンサは 2000 x 2000 ピクセル、8 bit の CMOS イメージャと 74 x 74 度の広角レンズで構成し、1 frame/sec のレートで可視光撮像を行う。取得したデータは分離カメラ内のメモリに一旦記録し、デジタル通信により 4 Mbps で母船側へ送信することができる。観測は分離カメラ内部の一次電池が切れるか、分離カメラが小惑星に衝突するまで継続し、数時間の観測で合計 5 Gbit 程度の画像データを取得することを計画している。

本発表では、科学観測機器としての DCAM3 について、そのサイエンスと開発状況について報告する。

## はやぶさ2 サンプラーで挑む近地球C型小惑星の表面多様性 Hayabusa-2 sampler: Surface variety of near-Earth C-type asteroid

橋 省吾<sup>1\*</sup>, 澤田 弘崇<sup>2</sup>, 岡崎 隆司<sup>3</sup>, 高野 淑識<sup>4</sup>, 岡本 千里<sup>2</sup>, 矢野 創<sup>2</sup>, 黒澤 耕介<sup>2</sup>, 和田 浩二<sup>5</sup>, はやぶさ2 サンプラーチーム<sup>2</sup>  
Shogo Tachibana<sup>1\*</sup>, Hirotaka Sawada<sup>2</sup>, Ryuji Okazaki<sup>3</sup>, Yoshinori Takano<sup>4</sup>, Chisato Okamoto<sup>2</sup>, Hajime Yano<sup>2</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>2</sup>,  
Koji Wada<sup>5</sup>, Hayabusa-2 sampler team<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 九州大学大学院理学研究院, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), <sup>5</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

Samples from C-type asteroids, which are abundantly present in the asteroid belt and of which reflectance spectra resemble those of carbonaceous chondrites, may well preserve the information covering the long history of the solar system, compared to other bodies such as comets and Itokawa-like bodies. Their scientific values will be significantly increased for return samples obtained with detailed geological contexts. Moreover, surface samples from near-Earth C-type asteroids will provide insights into the space weathering of C-type asteroids and the surface thermal processes due to irradiation of sunlight, which cannot be obtained from meteorites and interplanetary dust particles. The Hayabusa-2 is a sample return mission from a near-Earth C-type asteroid 1999JU3 (2014-2020). Here we describe a sampling system of the Hayabusa-2 spacecraft to obtain samples from multiple surface locations of the asteroid with minimal contamination and a possible sampling strategy.

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, サンプルリターン, 探査

Keywords: Hayabusa-2, asteroid, sample return, space exploration

## (162173) 1999 JU3 の国際キャンペーン測光観測 International Campaign of (162173)1999 JU3 Lightcurve Observation

長谷川 直<sup>1\*</sup>, 黒田 大介<sup>2</sup>, 石黒 正晃<sup>3</sup>, Hayabusa 2 地上観測グループ<sup>4</sup>

Sunao Hasegawa<sup>1\*</sup>, KURODA, Daisuke<sup>2</sup>, Masateru Ishiguro<sup>3</sup>, Hayabusa 2 Ground-based Observation Sub-group<sup>4</sup>

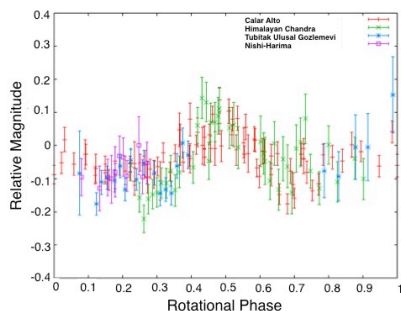
<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> ソウル大学, <sup>4</sup> \_

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>3</sup>Seoul National University, <sup>4</sup> \_

The observations were carried out at 32 nights during 2011-2012 apparition using 13 telescopes. The telescopes we used are as follows: the University of Hawaii 88-inch (2.2-m), Lulin Observatory (1.0-m), Nishi-Harima Astronomical Observatory Nayuta telescope (2.0-m), Himalayan Chandra Telescope (2.0-m), Tenagra II (0.8-m), Bosque Alegre (1.5-m), Magellan Baade (6.5-m), Calar Alto (1.2-m), Tubitak Ulusal Golemevi (1.0-m), MOA-I and II (0.6-m and 1.8-m), IRSF (1.4-m) and ESO/MPI (2.2m). We would like to emphasize that low solar phase angle (Sun-Asteroid-Observer's angle) data were acquired during 2011-2012 apparition which were not covered by 2007-2008 data. The new data sets enable to derive the accurate absolute magnitude and albedo.

(162173) 1999 JU3 (hereafter 1999 JU3) is a target asteroid of Hayabusa 2 sample return mission. The primary goal of the mission is to bring back samples from a C-type asteroid, which is considered to contain organics and hydrous minerals. It is scheduled to launch in 2014 and arrive at 1999 JU3 in 2018. Some physical properties of 1999 JU3 were determined during the last apparition in 2007-2008. It is classified into C-type asteroid through optical spectroscopic observations (Binzel et al. 2001; Vilas 2008). Lightcurve observations indicated that 1999 JU3 has a synodic rotational period of 7.6272 ± 0.0072 hr (Abe et al. 2008). From the mid-infrared observations, it was found that the asteroid has an effective diameter of 0.87 ± 0.03 km (Muller et al. 2011). The pole orientation derived by the lightcurve observations still has a large uncertainty (Kawakami 2009; Muller et al. 2011). We had another observational opportunity in 2011-2012 when the apparent magnitude was bright enough to derive absolute magnitude and lightcurve with 1-2 m class telescopes. Since this is the last observational opportunity before the spacecraft launch, we, Hayabusa 2 Ground-based Observation group, conducted a global observational campaign to acquire the optical magnitude. In this presentation we report the results based on the campaign data.

We analyzed the photometric data using IRAF. As the results, we firstly derived the synodic rotational period of 7.631 ± 0.0072 hr. The result coincides with the previous result to an accuracy of our measurement. We found that the amplitude of the lightcurve was subdued with an amplitude of ~0.05 mag. Because the amplitude had been always small regardless of the observing angles (parameterized by 'phase-angle-bisector'), 1999 JU3 must have nearly spherical shape, which makes it difficult to determine the pole orientation. In collaboration with experts in asteroid shape model and thermal model, Dr. J. Durech and T. Muller, some physical parameters were studied using our data. As the results, it is found that (i) the absolute magnitude is 19.20±0.12, (ii) the geometric albedo is 0.057±0.025 typical for C-type asteroids, (iii) and the thermal inertia is 200±100 [J m<sup>-2</sup> s<sup>-0.5</sup> K<sup>-1</sup>] with the combination of mid-infrared data. As of 2013 February, we could not get conclusive result for the pole orientation, although the inclined pole solutions show better match to the observational data.



## 小惑星 1999JU3 の可視反射分光スペクトルの地上観測 Ground-based observations of visible spectroscopic properties of 1999 JU3

杉田 精司<sup>1\*</sup>, 黒田大介<sup>2</sup>, 亀田 真吾<sup>3</sup>, 長谷川 直<sup>4</sup>, 鎌田 俊一<sup>1</sup>, 廣井孝弘<sup>5</sup>, 安部 正真<sup>4</sup>, 石黒 正晃<sup>6</sup>, 高遠徳尚<sup>2</sup>, 吉川 真<sup>4</sup>  
Seiji Sugita<sup>1\*</sup>, Daisuke Kuroda<sup>2</sup>, Shingo Kameda<sup>3</sup>, Sunao Hasegawa<sup>4</sup>, Shunichi Kamata<sup>1</sup>, Takahiro Hiroi<sup>5</sup>, Masanao Abe<sup>4</sup>,  
Masateru Ishiguro<sup>6</sup>, Naruhisa Takato<sup>2</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 立教大学, <sup>4</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>5</sup> ブラウン大学, <sup>6</sup> ソウル大学

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>NAOJ, <sup>3</sup>Rikkyo University, <sup>4</sup>JAXA, <sup>5</sup>Brown University, <sup>6</sup>Seoul University

小惑星 162173 (1999 JU3) は、はやぶさ 2 の探査対象天体である。1999 JU3 が広義の C 型小惑星であることは確実であるが、C 型のどのサブタイプのスペクトルを持つのかについては議論の余地が残る状況である。どのサブタイプの小惑星なのか、どの程度の表面不均一性を持った小惑星なのかによって、最適な観測運用計画も期待される科学成果の内容は大きく異なってくる。最適な観測運用計画の立案には時間がかかるし、科学成果最大化のためには事前に十分な時間を掛けて関連研究を進めることが必須である。こうした事前準備を行うためには、はやぶさ 2 が探査小惑星に到達する十分前に基本的なスペクトル観測を行う必要がある。本稿では、最近の我々の地上観測の結果を紹介する。

2012 年夏に訪れた 1999 JU3 の観測好期においては、世界の多くの大望遠鏡と共に我々も 1999 JU3 の可視分光観測をチリにある GEMINI-South 望遠鏡および GMOS 装置によって可視分光を用いて行った。6月24日, 26日, 7月5日の3夜において良好な大気条件で観測を行うことができた。

予備的解析からは、Vilas [2008] が 2007 年 9 月に得たデータに類似した非常にフラットなスペクトルが様々な自転位相に対して得られるという結果が得られた。これらのスペクトルを主成分分析したところ、我々の得たスペクトルは、Binzel et al. [2001] が得たスペクトルとは大きく離れており、Vilas の 2007 年 9 月のデータと非常に近いことが定量的に示される結果となった。また、最近の他の望遠鏡での観測結果 [5,6] も我々の結果と概ね調和的であり、非常にフラットなスペクトルを持つ物質が 1999JU3 の表面の多くの面積を覆っている可能性が高いことを強く示唆している。その一方、Vilas [4] の 2007 年 7 月のデータを修正ガウスモデルでフィットしたところ、0.65  $\mu$ m 近傍に見える吸収帯が、メインベルトに見られる 0.7  $\mu$ m 吸収帯と整合的なバンド幅およびバンド中心波長の値を示した。

さらに、人工的に加熱した炭素質隕石の試料の反射スペクトルと、本研究および過去の研究で得られた 1999 JU3 のスペクトルを比較した。その結果、大きなバラエティーを持ついずれのスペクトルも、Murchison 隕石 (CM2) の試料の幾つかの温度での加熱実験結果と非常に良い一致をすることが分かった。その一方で、このような一致は、Allende 隕石 (CV3) や Ivuna 隕石 (CI) の加熱試料との間には見ることができなかった。

本研究の観測および過去の観測で得られたデータを総合すると、1999 JU3 の大部分の表面は比較的高温に加熱脱水を経験した CM2 隕石に似た物質で覆われている可能性が高いことが示唆される。また、これまで報告されてきた多種多様なスペクトルは、CM2 隕石の異なった温度での加熱によって説明できることも判明した。これは、1999 JU3 が基本的には、CM2 隕石に似た非常に水や有機物に富んだ母天体の衝突破片ないしその集合体である可能性を示唆する。軌道計算に基づいて、1999JU3 が 6 共鳴帯付近の小惑星族起源である可能性が提案されている。この条件に合う小惑星族は多くなく、小惑星 163 Erigone が有力な候補となるかもしれない。

謝辞：本観測の実現ためには、国立天文台からの多大なるご支援を戴いた。ここに謝意を表したい。

キーワード: 小惑星, 反射スペクトル, はやぶさ 2, リモートセンシング観測, 始原天体

Keywords: asteroids, reflectance spectroscopy, Hayabusa-2 mission, remote sensing, primitive bodies



## はやぶさ2の統合サイエンス Interdisciplinary science of Hayabusa 2 mission

渡邊 誠一郎<sup>1\*</sup>, 小林 直樹<sup>2</sup>, 藤本 正樹<sup>2</sup>, はやぶさ2 統合サイエンスチーム<sup>3</sup>

Sei-ichiro WATANABE<sup>1\*</sup>, Naoki Kobayashi<sup>2</sup>, Masaki Fujimoto<sup>2</sup>, Hayabusa 2 Interdisciplinary Science Team<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>3</sup> はやぶさ2 サイエンスチーム

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>JAXA/ISAS, <sup>3</sup>Hayabusa 2 Science Team

はやぶさ2 ミッションはC型の地球接近小惑星 1999 JU3 を探査対象天体とし、ランデブー観測と宇宙衝突実験、およびサンプルリターンを行うため、2014年12月の打ち上げをめざして開発が進められている。はやぶさ2には理学機器（一部はバス機器を兼ねる）として、近赤外分光計 (NIRS3)、中間赤外線カメラ (TIR)、可視カメラ (ONC-T)、レーザ高度計 (LIDAR)、サンブラ (SMP)、衝突装置 (SCI)、理学観測用分離カメラ (DCAM-D)、小型ランダ (MASCOT) などが搭載される。ONC-Tは7バンドのフィルタ（うち1つはNaD線検出用狭帯域フィルタ）による分光観測が可能である。MASCOTに搭載された分光顕微鏡 (MicrOmega) は分解能 20 μm で波長 0.9 - 3.5 μm を分光する。はやぶさ2の観測・実験・サンプリングでは、個々の機器に閉じない統合的なサイエンスを展開する必要がある。

宇宙科学研究所宇宙理学委員会の下に設置されたはやぶさ2 タスクフォースでの横断的な検討を継承する形で、はやぶさ2 プロジェクトでは2012年末に統合サイエンスチームを立ち上げ、(1) サイエンスの全体像の構築、(2) 各機器の科学データの統合により構築できる横断的テーマの拾い出し、(3) ミッションシナリオに対する理学的制約条件の明確化、(4) プロジェクトの科学の裾野を広げる「小惑星からの惑星科学」を推進、といった目標を掲げて検討を開始している。

検討の一例を挙げよう。より始原的な試料を捕獲するためには、サンプリング前にリモートセンシングデータを用いて天体表面の不均一性を把握して着地点を決めることが必須である。このためには、表面温度の日変化、表面地形や粒子粒径分布、含水量（含水鉱物）分布、宇宙風化度、不溶性有機炭素 (IOC) 量などといった情報が重要であり、これらを制約する指標を NIRS3, TIR, ONC, LIDAR などの機器観測データから計算して、グローバルマッピングすることが求められる。

表面温度は TIR が主担当だが、高温時は NIRS3 の 2.5 μm 付近の熱放射の観測と組み合わせで解析すべきである。表面地形や粒径は ONC, LIDAR, TIR が独立な情報を与えるため、それらの統合が必要となる。含水率（含水鉱物）推定のためには NIRS3 による 3 μm 帯の吸収の深さと形状の観測と、ONC-T による w 帯（波長 0.70 μm）の吸収深さの観測を組み合わせで議論することが有効であろう。C型小惑星の宇宙風化度は未解明な点が多いが、NIRS3 による近赤外反射スペクトル勾配の他、ONC の多色分光や LIDAR レーザ光（波長 1.064 μm）の幾何アルベドデータなどが関わると予想される。IOC 量推定には ONC-T による v 帯（0.55 μm）の絶対反射率が有効であるが、NIRS3 や TIR などからの制約も検討すべきである。

サンプリングのための着地は3回予定されており、天体の自転軸の方向によっては事前解析に充てられる時間はかなり短くなるため、迅速な解析が求められる。事前に的確な戦略を構築する必要がある。そのため、地上での炭素質コンドライト試料を用いた宇宙風化や熱変性の模擬実験と反射スペクトルの取得やはやぶさ初号機のイトカワデータを使った模擬解析などを検討している。

統合サイエンスチームで検討すべき他のテーマとしては、想定される天体表面状態に応じたサイエンス戦略、SCI で形成された人工クレーターを観測計画、地上分析戦略、理学的見地からのミッションシナリオの詳細化、1999 JU3 の起源と進化のモデル構築（地上観測と天体力学の組み合わせ）、小惑星メインベルトからの物質供給メカニズムの解明などがある。

講演では、統合サイエンスチームの検討の現状を紹介する。

キーワード: 小惑星, 1999 JU3, リモートセンシング, 宇宙惑星物質科学, 衝突の科学, 惑星探査

Keywords: asteroids, 1999 JU3, remote sensing, cosmic and planetary material science, science of collision phenomena, planetary exploration

## 小天体進化における衝突の役割 Evolution of small bodies: The role of collision

中村 昭子<sup>1\*</sup>

Akiko Nakamura<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

衝突は、小天体の質量分布に変化をもたらす。すなわち、小天体どうしの合体成長、衝突による小天体からの質量放出、衝突破壊により、小惑星の質量-個数分布が変化する。これまでの研究により、岩石質の天体は大きくなるほど弱いひびを含みうるので衝突破壊強度が小さくなるということが示されている。一方、近年の観測により、太陽系小天体の空隙率は広い範囲にわたり、小惑星のS型とC型では典型的な値が異なることが示唆されている。空隙率は、熱進化度や水質変性の有無を反映していると考えられる。そこで、我々は岩石と均質な多孔質物質を標的として、サイズスケールを変化させた室内衝突破壊実験を行い、多孔質物質の場合には岩石標的で見られた衝突破壊強度のサイズ依存性が明瞭に見られないという結果を得た。この結果が小天体進化にあてはめられるとすると、天体の熱進化度や水質変性の有無の異なる天体は、異なる様式や時間変化でサイズ分布進化をした可能性があるかもしれない。

衝突は、小天体の構造変化へ寄与する。衝突によって天体内部のクラックの成長が促され小天体の強度が減少する、衝突により小天体は圧密されて空隙を失いさらに加熱をうけて熱変性する、あるいは、衝突により連続体から粉粒体であるラブルパイル天体へと移行する、などが挙げられる。

衝突は、小天体の表面物質を変化させる。宇宙風化をうけた表面の剥ぎ取り新鮮な表面を露出する。ペスタの表面に見られたように他天体物質を供給し、表面の空間的な非一様性をもたらす。衝突によってラブルパイル天体に印加された振動は、天体表面の粒子の移動やサイズ偏析を促し、結果として、反射スペクトルや熱放射を変化させるかもしれない。

本発表では、小天体進化における衝突の3つの役割について、現状の理解を述べ、最近の室内実験の結果を併せて議論する。

キーワード: 小天体, 衝突, 進化

Keywords: small bodies, collision, evolution

小惑星帯での天体での衝突・破壊や力学から紡ぎだす太陽系起源  
Collisional fragmentation and dynamics of asteroids, and the solar system origin revealed  
by them

小林 浩<sup>1\*</sup>

Hiroshi Kobayashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>Nagoya University

Planets are formed via collisions of kilometer size of larger planetesimals such as asteroids. Collisional outcomes (coagulation or fragmentation) are very important to reveal the origin of the solar system. In spite of many efforts, we still have uncertainty of collisional physics for such large bodies. The size distribution of bodies are affected by collisional outcomes and hence the size distribution of asteroids may give a clue to clarify collisions of such large bodies and the origin of the solar system.

キーワード: 太陽系起源, 小惑星, 衝突, 天体力学

Keywords: Origin of the solar system, asteroids, collisional physics, dynamics

## 反射スペクトルから推定されるC型小惑星の多様性 Material diversity of C-type asteroids with reference to their reflectance spectra

中村 智樹<sup>1\*</sup>, 中藤亜衣子<sup>2</sup>, 三須貴瑛<sup>1</sup>, 松岡萌<sup>1</sup>, 脇田茂<sup>3</sup>, 廣井孝弘<sup>4</sup>, 佐々木晶<sup>3</sup>

Tomoki Nakamura<sup>1\*</sup>, NAKATO Aiko<sup>2</sup>, MISU Takaaki<sup>1</sup>, MATSUOKA Moe<sup>1</sup>, WAKITA Shigeru<sup>3</sup>, HIROI TAKAHIRO<sup>4</sup>, SASAKI Sho<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> ニューメキシコ大学, <sup>3</sup> 国立天文台, <sup>4</sup> ブラウン大学

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>University of New Mexico, <sup>3</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>4</sup>Brown University

The target asteroid of Hayabusa 2 mission is Near-Earth asteroid 162173 (1999JU3) with a size of  $0.87 \pm 0.03$  km and a low albedo  $0.070 \pm 0.006$  (Muller et al. 2011). It is a C-type asteroid whose reflectance spectrum shows a 0.7 micron absorption band (Vilas, 2008), similar to CM-type carbonaceous chondrite meteorites. However, recent telescopic observations of JU3 failed to detect the 0.7 micron band, which probably indicates material diversity of the JU3 surface.

In the early solar system, rocky particles were accreted with icy particles to form C-type asteroids. Internal heating due to the decay of short-lived radionuclide  $^{26}\text{Al}$  has taken place within 5 million years after the birth of CAIs and molten ice to facilitate water-rock reactions. The deeper portions of the asteroids suffered high temperature heating and thus heavy aqueous alteration, while shallow layers experienced low-degree of alteration at low temperatures. This leads to the formation of zoned structure from heavy altered interior to weakly altered surface. The aqueous alteration reactions ceased sometime between 10 to 100 million years after CAI formation.

However, if we assume that JU3 formed with a size of 1km, which is comparable to current size, at 2 Myr after CAI formation, the internal temperature cannot reach melting temperature of ice by the decay heat of  $^{26}\text{Al}$ . In this case, aqueous alteration has never taken place in JU3, which contradicts the detection of hydrous minerals from JU3. Therefore, JU3 might have been much larger than current size when it formed and later disaggregated. This suggests that JU3 is a rubble pile asteroid and the zoning structure of alteration is expected to observe.

During 4.6 billion years after formation, surfaces of JU3 have been subject to impacts. Dust particles, the largest population is 200 microns, and solar winds continuously hit the surface of the asteroids, which results in changes of materials, called "Space weathering". We have simulated dust-particle impacts on C-type asteroids experimentally. Pulse laser heating on the CM chondrite surfaces succeeds to reproduce "bluing" of the reflectance spectra (Matsuoka et al. 2013), which is observed from space-weathered C-type asteroids. The blueing agents are probably nano-particles of iron sulfides and amorphization of Fe-rich serpentine.

Along with micrometeorite bombardments, large scale impacts occur occasionally on the asteroids which leads devolatilization of hydrous material. In fact, many C-type asteroids show reflectance spectra similar to dehydrated carbonaceous chondrites. Recent mineralogical investigation of such dehydrated CM chondrites revealed a wide variation of mineralogy in terms of dehydration (Nakato et al. 2013).

キーワード: 反射スペクトル, C型小惑星

Keywords: Reflectance Spectra, C-type asteroids

## ポストはやぶさ2 ミッションの検討状況 Post-Hayabusa2 mission

吉川 真<sup>1\*</sup>, 矢野 創<sup>1</sup>, 中村 良介<sup>2</sup>, 松浦 周二<sup>1</sup>, 橘 省吾<sup>3</sup>, 船瀬 龍<sup>4</sup>, 森 治<sup>1</sup>  
Makoto Yoshikawa<sup>1\*</sup>, Hajime Yano<sup>1</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>2</sup>, Shuji Matsuura<sup>1</sup>, Shogo Tachibana<sup>3</sup>, Ryu Funase<sup>4</sup>, Osamu Mori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 東京大学

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Science and Technology, <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>The University of Tokyo

「はやぶさ」ミッションが終了し、その後継ミッションとして「はやぶさ2」が動き出している。「はやぶさ2」は2014年の打ち上げ予定で、地球帰還は2020年である。そして今、「はやぶさ2」の次のミッションについての検討が始まっている。すでに数年前から「はやぶさ2」の次のミッションとして、「はやぶさ Mk2」というものを検討していた。このミッションも、同様にサンプルリターンミッションであるが、D型天体ないしウイルソン・ハリントンのような枯渇彗星核からのサンプルリターンを目指すものであった。しかし、状況が変化してきたため、再検討を行い、現在はトロヤ群へのミッションについて検討を行っている。本講演では、現時点での検討状況について報告する。

キーワード: 小惑星, 探査, はやぶさ

Keywords: Asteroid, Exploration, Hayabusa

## ソーラー電力セイルによるクルージング・ランデブー科学観測： 深宇宙天文学から太陽系探査まで

### Scientific Observations during Cruising and Rendezvous Phases of the Solar Power Sail

松浦周二<sup>1</sup>, 矢野 創<sup>1\*</sup>, 米徳大輔<sup>2</sup>, 高島健<sup>1</sup>, 藤本正樹<sup>1</sup>, 佐々木晶<sup>3</sup>, 吉田二美<sup>3</sup>, 小久保英一郎<sup>3</sup>, 高遠徳尚<sup>3</sup>, 中村良介<sup>4</sup>, 吉川真<sup>1</sup>, 船瀬龍<sup>5</sup>, 森治<sup>1</sup>

Shuji Matsuura<sup>1</sup>, Hajime Yano<sup>1\*</sup>, Daisuke Yonetoku<sup>2</sup>, Takeshi Takashima<sup>1</sup>, Masaki Fujimoto<sup>1</sup>, Sho Sasaki<sup>3</sup>, Fumi Yoshida<sup>3</sup>, Eiichiro Kokubo<sup>3</sup>, Naruhisa Takato<sup>3</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>4</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>1</sup>, Ryu Funase<sup>5</sup>, Osamu Mori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 金沢大学, <sup>3</sup> 国立天文台, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所, <sup>5</sup> 東京大学

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>Kanazawa University, <sup>3</sup>NAOJ, <sup>4</sup>AIST, <sup>5</sup>University of Tokyo

Following successful demonstration of deep space solar sail technique by IKAROS, the solar power sail is a deep space probe with hybrid propulsion of solar photon sail and ion engine system that will enable Japan to reach out deep interplanetary space beyond the main asteroid belt. For over the last decade, we have been investigating interdisciplinary space science areas that will benefit respective scientific premises from such a deep space observation platform mainly during its cruising phase. They include: (1) infrared astronomy to observe the first generation stars as the IR cosmic background radiation being discriminated from the foreground scattering of zodiacal light due to (2) cosmic dust, which at the same time hit a large cross section of the solar sail membrane dust detector, concentrating inside the main asteroid belt, and (3) gamma-ray astronomy to identify burst sources by taking advantage of an extremely long baseline with the terrestrial observatories as counterparts. Recently, the mission design has extended from cruising and fly-by only to rendezvous and sample return options from Jovian Trojan asteroids, en route Jovian gravity assist. Then, scientific observation opportunities gain for (4) Jovian magnetosphere interacting with the solar wind, (5) multiple flybys of asteroids at the main belt and the Jovian Trojan region, and (6) semi-intact sampling of both interplanetary dust at 5.2 AU heliocentric distance and surface compositions of a most-likely D-type asteroid in the Trojan clan. We also investigate possible synergy effects among these interdisciplinary observation plans and respective available instruments, such as IR and dust, gamma-ray and solar wind.

キーワード: ソーラー電力セイル, 赤外線天文学, ガンマ線天文学, 黄道光ダスト, 木星磁気圏, 木星トロヤ群小惑星

Keywords: Solar Power Sail, Infrared Astronomy, Gamma-ray Astronomy, Zodiacal Light Dust, Jovian Magnetosphere, Jovian Trojan Asteroids

## IKAROS とソーラー電力セイルによる外惑星領域往復ミッション IKAROS and Solar Power Sail Mission for a Round Trip to Outer Solar System

森 治<sup>1\*</sup>, 船瀬龍<sup>2</sup>, 津田雄一<sup>1</sup>, 佐伯孝尚<sup>1</sup>, 白澤洋次<sup>1</sup>, 三桝裕也<sup>1</sup>, 川口淳一郎<sup>1</sup>, 吉川真<sup>1</sup>, 矢野創<sup>1</sup>, 中村良介<sup>3</sup>, 松浦周二<sup>1</sup>, 米徳大輔<sup>4</sup>

Osamu Mori<sup>1\*</sup>, FUNASE, Ryu<sup>2</sup>, TSUDA, Yuichi<sup>1</sup>, SAIKI, Takanao<sup>1</sup>, SHIRASAWA, Yoji<sup>1</sup>, MIMASU, Yuya<sup>1</sup>, KAWAGUCHI, Junichiro<sup>1</sup>, YOSHIKAWA, Makoto<sup>1</sup>, YANO, Hajime<sup>1</sup>, NAKAMURA, Ryosuke<sup>3</sup>, MATSUURA, Shuji<sup>1</sup>, YONETOKU, Daisuke<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所, <sup>4</sup> 金沢大学

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>University of Tokyo, <sup>3</sup>AIST, <sup>4</sup>Kanazawa University

「ソーラーセイル」は、宇宙空間でセイルを展開し、太陽光圧を受けて加速する宇宙帆船であり、燃料なしで航行することが可能である。一方、「ソーラー電力セイル」は、セイルの一部を薄膜太陽電池とすることで、光子加速と同時に太陽光発電も行う日本独自のアイデアである。JAXAは、2010年5月に小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」を打ち上げ、世界初のソーラーセイルの実現およびソーラー電力セイルのアイデアの実証に成功した。

ソーラー電力セイルは、大面積の薄膜太陽電池によって外惑星領域でも十分な電力を確保できる。この大電力を用いて高比推力のイオンエンジンを駆動すれば、ソーラーセイルと合わせたハイブリッド推進が可能となり、次世代の推進機関として幅広い応用が期待できる。このコンセプトを踏まえ、ソーラー電力セイルによって外惑星領域往復探査を提案する。なお、ソーラー電力セイル技術以外にも、今後の深宇宙探査に必須となる技術も併せて実証する。さらに、この計画では深宇宙空間の巡航飛行中に科学観測を実施すると同時に世界で初めて小惑星帯以遠のダストおよびトロヤ群小惑星のサンプル採取を実現する。

キーワード: ソーラーセイル, ソーラー電力セイル, 外惑星, 往復, サンプルリターン

Keywords: Solar sail, Solar power sail, Outer solar system, Round trip, Sample return

