

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^{1*}

Yasunori Miura^{1*}

¹ 客員 (国内外大学)

¹ 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^{1*}, ギュットラー カーステン¹, 中村 昭子¹, ハーゲマン ヤンヘンドリック², 和田 浩二³, プリュム ユーリアン²
Takaya Okamoto^{1*}, Carsten Guettler¹, Akiko Nakamura¹, Jan-Hendrik Hagemann², Koji Wada³, Jurgen Blum²

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

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Braunschweig University of Technology, ³Planetary 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 cm s^{-1} - 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 0.1mm 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 $\sim 5\text{cm s}^{-1}$, 23cm s^{-1} , $\sim 50\text{cm s}^{-1}$ の 3 通り、またチャンパー内圧力は $\sim 20\ \text{Pa}$ 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^{1*}, 青木隆修¹, 中村昭子¹

Masato Kiuchi^{1*}, Aoki Takanobu¹, Akiko Nakamura¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ 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 μ 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 μ 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^{1*}, 中村 昭子¹, 岡本 尚也¹, 長谷川 直²
Hiroki Nagaoka^{1*}, NAKAMURA, Akiko¹, OKAMOTO, Takaya¹, HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙科学研究所

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Institute 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 (Bottke 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 μ 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¹, 平田 成^{1*}, 和田 浩二², 千秋 博紀², 矢野 創³, 荒川 政彦⁴
MITSUTA, Tomohiko¹, Naru Hirata^{1*}, Koji Wada², Hiroki Senshu², Hajime Yano³, Masahiko Arakawa⁴

¹ 会津大学, ² 千葉工業大学惑星探査研究センター, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 神戸大学大学院理学研究科
¹Univ. of Aizu, ²Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ³Institute of Space and Astronautical Science and JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exp, ⁴Graduate 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^{1*}, 佐藤 允基¹, 長勇 一郎², 鈴木 秀彦¹, 山田 学³, 亀田 真吾¹, はやぶさ 2 ONC チーム⁴

TAKEI, Akito^{1*}, SATO, Masaki¹, CHO, Yuitiro², SUZUKI, Hidehiko¹, YAMADA, Manabu³, KAMEDA, Shingo¹, Hayabusa2 ONC team⁴

¹ 立教大学, ² 東京大学, ³ 千葉工大, ⁴ 宇宙航空開発研究機構

¹Rikkyo Univ., ²Tokyo Univ., ³Chiba Institute of Technology, ⁴JAXA

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^{1*}, 北里 宏平², 安部 正真¹, 大竹 真紀子¹, 松浦 周二¹, 津村 耕司¹, 仲内 悠祐³, 荒井 武彦⁴, 廣井 孝弘⁵, 千秋 博紀⁶, 小松 睦美⁷, 中村 智樹⁸, 渡邊 誠一郎⁹

Takahiro Iwata^{1*}, Kohei Kitazato², Masanao Abe¹, Makiko Ohtake¹, Shuji Matsuura¹, Koji Tsumura¹, Yusuke Nakauchi³, Takehiko Arai⁴, Takahiro Hiroi⁵, Hiroki Senshu⁶, Mutsumi Komatsu⁷, Tomoki Nakamura⁸, Sei-ichiro WATANABE⁹

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

¹ISAS/JAXA, ²Univ. Aizu, ³Graduate Univ. Advanced Studies, ⁴NAOJ, ⁵Brown Univ., ⁶Chiba Inst. Tech., ⁷Waseda Inst. Adv. Study, ⁸Tohoku Univ., ⁹Nagoya 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^{1*}, 福原 哲哉², 田中 智¹, 田口 真³, 荒井 武彦⁴, 千秋 博紀⁵, 小川 佳子⁶, 北里 宏平⁶, 出村 裕英⁶, 中村 良介⁸, 関口 朋彦⁹, 長谷川 直¹, 今村 剛¹, 松永 恒雄⁷, 和田 武彦¹, 滝田 隼¹⁰, 坂谷 尚哉¹¹, Helbert Jorn¹², Mueller Thomas G.¹³, Hagermann Axel¹⁴

Tatsuaki Okada^{1*}, Tetsuya Fukuhara², Satoshi Tanaka¹, Makoto Taguchi³, Takehiko Arai⁴, Hiroki Senshu⁵, Yoshiko Ogawa⁶, Kohei Kitazato⁶, Hirohide Demura⁶, Ryosuke Nakamura⁸, Tomohiko Sekiguchi⁹, Sunao Hasegawa¹, Takeshi Imamura¹, Tsuneo Matsunaga⁷, WADA, Takehiko¹, Jun Takita¹⁰, Naoya Sakatani¹¹, HELBERT, Joern¹², MUELLER, Thomas G.¹³, HAGERMANN, Axel¹⁴

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

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ²Hokkaido University, ³Rikkyo University, ⁴National Astronomical Observatory of Japan, ⁵Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ⁶University of Aizu, ⁷National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ⁸Hokkaido University of Education, ⁹National Institute for Environmental Studies, ¹⁰University of Tokyo, ¹¹Graduate University for Advanced Studies, ¹²German Aerospace Center, ¹³Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, ¹⁴Open 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° 、有効画素数は 320×240 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 ± 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 ± 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^{1*}, 山口璃恵¹

Makoto Taguchi^{1*}, Rie Yamaguchi¹

¹ 立教大学

¹Rikkyo 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^{1*}, 小林 正規¹, 服部 真季², 押上 祥子³, 並木 則行¹, 水野 貴秀⁴, LIDARサイエンスグループ¹
Hiroki Senshu^{1*}, Masanori Kobayashi¹, Maki Hattori², Shoko Oshigami³, Noriyuki Namiki¹, Takahide Mizuno⁴, Hayabusa-2
LIDAR Science group¹

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

¹PERC/ Chitech, ²Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, ³National Astronomical Observatory of Japan, ⁴Japan 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^{1*}
Yuichi Tsuda^{1*}

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹ISAS/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^{1*}, 荒川 政彦², 飯島 祐一¹, 白井 慶¹, 和田 浩二³, 本田 理恵⁴, 澤田 弘崇¹, 石橋 高³, 坂谷 尚哉⁵, 門野 敏彦⁶, 中澤 暁¹, 小林 正規³, 早川 基¹

Kazunori Ogawa^{1*}, Masahiko Arakawa², Yuichi Iijima¹, Kei Shirai¹, Koji Wada³, Rie Honda⁴, Sawada Hiroataka¹, Ko Ishibashi³, Naoya Sakatani⁵, Toshihiko Kadono⁶, Satoru Nakazawa¹, Masanori Kobayashi³, Hajime Hayakawa¹

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

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Kobe University, ³Chiba Institute of Technology, ⁴Kochi University, ⁵The Graduate University for Advanced Studies, ⁶University 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できる。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リング則の構築を通して、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リング則の構築である。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^{1*}, 澤田 弘崇², 岡崎 隆司³, 高野 淑識⁴, 岡本 千里², 矢野 創², 黒澤 耕介², 和田 浩二⁵, はやぶさ2 サンプラーチーム²
Shogo Tachibana^{1*}, Hiroataka Sawada², Ryuji Okazaki³, Yoshinori Takano⁴, Chisato Okamoto², Hajime Yano², Kosuke Kurosawa²,
Koji Wada⁵, Hayabusa-2 sampler team²

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

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ⁴Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), ⁵Planetary 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^{1*}, 黒田 大介², 石黒 正晃³, Hayabusa 2 地上観測グループ⁴

Sunao Hasegawa^{1*}, KURODA, Daisuke², Masateru Ishiguro³, Hayabusa 2 Ground-based Observation Sub-group⁴

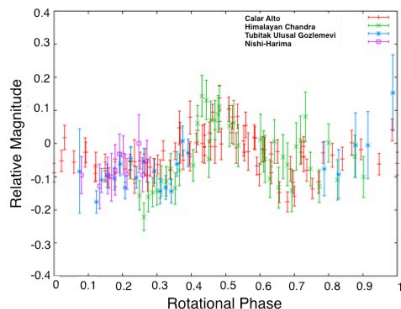
¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立天文台, ³ ソウル大学, ⁴ _

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³Seoul National University, ⁴ _

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⁻² s^{-0.5} K⁻¹] 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^{1*}, 黒田大介², 亀田 真吾³, 長谷川 直⁴, 鎌田 俊一¹, 廣井孝弘⁵, 安部 正真⁴, 石黒 正晃⁶, 高遠徳尚², 吉川 真⁴
Seiji Sugita^{1*}, Daisuke Kuroda², Shingo Kameda³, Sunao Hasegawa⁴, Shunichi Kamata¹, Takahiro Hiroi⁵, Masanao Abe⁴,
Masateru Ishiguro⁶, Naruhisa Takato², Makoto Yoshikawa⁴

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

¹University of Tokyo, ²NAOJ, ³Rikkyo University, ⁴JAXA, ⁵Brown University, ⁶Seoul 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 μ m 近傍に見える吸収帯が、メインベルトに見られる 0.7 μ 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^{1*}, 小林 直樹², 藤本 正樹², はやぶさ2 統合サイエンスチーム³

Sei-ichiro WATANABE^{1*}, Naoki Kobayashi², Masaki Fujimoto², Hayabusa 2 Interdisciplinary Science Team³

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

¹Nagoya University, ²JAXA/ISAS, ³Hayabusa 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て解析すべきである。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て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^{1*}
Akiko Nakamura^{1*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹Department 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^{1*}

Hiroshi Kobayashi^{1*}

¹ 名古屋大学

¹Nagoya 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^{1*}, 中藤亜衣子², 三須貴瑛¹, 松岡萌¹, 脇田茂³, 廣井孝弘⁴, 佐々木晶³

Tomoki Nakamura^{1*}, NAKATO Aiko², MISU Takaaki¹, MATSUOKA Moe¹, WAKITA Shigeru³, HIROI TAKAHIRO⁴, SASAKI Sho³

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

¹Tohoku University, ²University of New Mexico, ³National Astronomical Observatory of Japan, ⁴Brown University

The target asteroid of Hayabusa 2 mission is Near-Earth asteroid 162173 (1999JU3) with a size of 0.87 ± 0.03 km and a low albedo 0.070 ± 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 ²⁶Al 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 ²⁶Al. 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^{1*}, 矢野 創¹, 中村 良介², 松浦 周二¹, 橘 省吾³, 船瀬 龍⁴, 森 治¹
Makoto Yoshikawa^{1*}, Hajime Yano¹, Ryosuke Nakamura², Shuji Matsuura¹, Shogo Tachibana³, Ryu Funase⁴, Osamu Mori¹

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

¹JAXA, ²National Institute of Advanced Science and Technology, ³Hokkaido University, ⁴The 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型天体ないしウィルソン・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

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

Shuji Matsuura¹, Hajime Yano^{1*}, Daisuke Yonetoku², Takeshi Takashima¹, Masaki Fujimoto¹, Sho Sasaki³, Fumi Yoshida³, Eiichiro Kokubo³, Naruhisa Takato³, Ryosuke Nakamura⁴, Makoto Yoshikawa¹, Ryu Funase⁵, Osamu Mori¹

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

¹ISAS/JAXA, ²Kanazawa University, ³NAOJ, ⁴AIST, ⁵University 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^{1*}, 船瀬龍², 津田雄一¹, 佐伯孝尚¹, 白澤洋次¹, 三桝裕也¹, 川口淳一郎¹, 吉川真¹, 矢野創¹, 中村良介³, 松浦周二¹, 米徳大輔⁴

Osamu Mori^{1*}, FUNASE, Ryu², TSUDA, Yuichi¹, SAIKI, Takanao¹, SHIRASAWA, Yoji¹, MIMASU, Yuya¹, KAWAGUCHI, Junichiro¹, YOSHIKAWA, Makoto¹, YANO, Hajime¹, NAKAMURA, Ryosuke³, MATSUURA, Shuji¹, YONETOKU, Daisuke⁴

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

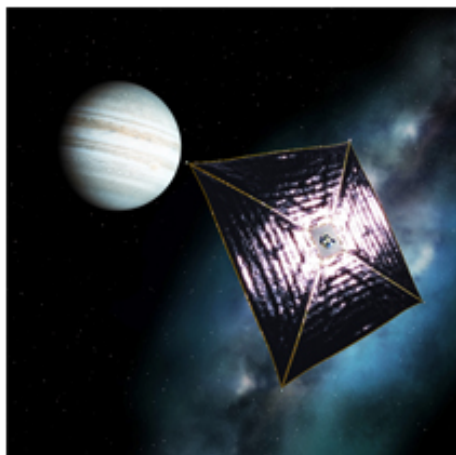
¹JAXA, ²University of Tokyo, ³AIST, ⁴Kanazawa University

「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



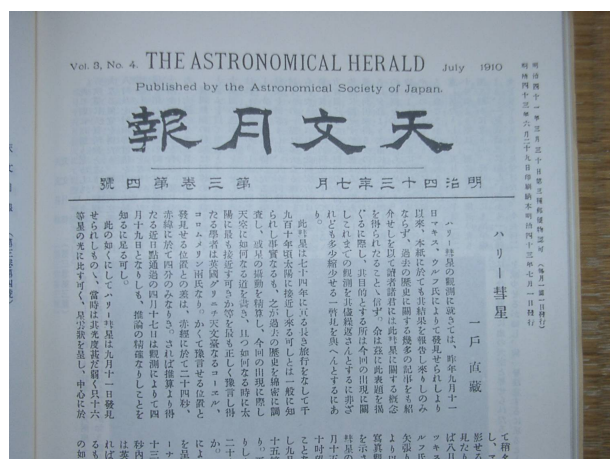
太陽系小天体名の発音調査 Pronunciations of the names of the minor solar system bodies

佐藤 勲^{1*}
Isao Sato^{1*}

¹ 宇宙用語研究会
¹JANNET

過去 20 年にわたる調査の結果、これまでに出現した彗星名の発音調査が完了した。その結果、「ハレー彗星」、「ハートレイ彗星」、「シューメーカー・レビー彗星」などは正しくなく、「ハリー彗星」、「ハートリー彗星」、「シューメーカー・リビー彗星」が正しいことがわかった。小惑星と衛星の名前についても調査が進んでおり、ラテン語読みで「キロン」、「ティタン」、「エンケラドゥス」、「ヒペリオン」などと表記すべきものが、英語読みで「カイロン」、「タイタン」、「エンセラダス」、「ハイペリオン」などと表記されているものが多い実態が明らかとなっている。このような混乱が引き起こされているのは、大学研究者がサイエンスばかりを重視して、用語についてまじめに議論してこなかったことが原因である。

キーワード: 太陽系小天体, 発音
Keywords: minor solar system bodies, pronunciation



ソーラー電力セイル小型実証機搭載 PVDF ダストセンサにおける固体微粒子衝突の校正実験

Ground calibration impact experiments on arrayed large-area dust detector for interplanetary space onboard IKAROS

岡本 千里^{1*}, 矢野 創¹, 田中 真², 平井 隆之³, 長谷川 直¹, 田端 誠¹, 尾川 順子¹, 岩井 岳夫⁴, 奥平 恭子⁵

Chisato Okamoto^{1*}, YANO, Hajime¹, TANAKA, Makoto², HIRAI, Takayuki³, HASEGAWA, Sunao¹, TABATA, Makoto¹, OGAWA, Junko¹, IWAI, Takeo⁴, OKUDAIRA, Kyoko⁵

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東海大学, ³ 総合研究大学院大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 会津大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Tokai University, ³The Graduate University for Advanced Studies, ⁴Tokyo University,

⁵The University of Aizu

半世紀にわたり太陽系探査が行われてきたが、太陽に近いために地上光学観測が困難であること、さらに探査機による直接観測・検出の機会が十分得られてこなかったために、今なお内惑星系太陽系ダストの分布モデルは不十分である。そこで、ソーラー電力セイル小型実証機「IKAROS」に搭載されたダストセンサである ALADDIN は、センサへの宇宙塵衝突の連続計測から、内惑星領域の太陽系ダストの分布を解明することを目的とし、ミッション期間の大部分を深宇宙空間のクルージングに費やす探査機に搭載された。2010年5月の打ち上げ以降、ALADDIN によって、地球公転軌道から金星近傍までのダスト連続計測が行われ、内惑星領域の太陽系ダストの分布の計測が行われている。ダストセンサは、PVDF(ポリフッ化ビニルデン)を使った軽量・薄型・大面積の計測器 (ALDN-S) であり、総面積 200 m² のセイル膜面上の一部 (0.3%) に搭載された。さらにそれらのセンサからの衝突信号をまとめて処理する電子回路部 (ALDN-E) をフレキシブルケーブルでつなぎ、その処理後信号を通信部に送るという構成である。ALADDIN の技術開発目的は、将来の外惑星探査ミッションに活用する予定の大面積ダスト検出器の深宇宙での実証および、1~0.7 AU におけるクルージング期間で、過去実績よりも同一観測期間内で一桁以上多いダスト衝突を検出し、大型ダストのフラックス精度、時間・空間分解能を向上させ、内惑星領域における、ダスト分布の日心距離依存性を評価することである。

ALADDIN が出す実宇宙計測データを評価するために、様々な質量と速度におけるダスト衝突について、IKAROS に搭載されたセンサの同等品 (フライトスペア) を用いた校正衝突実験が必要である。そこで、本研究では、様々な衝突条件における固体微粒子衝突をフライトモデルと同一品である PVDF センサに行い、衝突によるセンサ検出強度・感度を調べた。衝突実験では、ALDN-S の二種の PVDF センサ (500mm x 250mm x 20 ミクロン厚と 100mm x 80mm x 9 ミクロン厚) のフライトスペアを標的として、JAXA に設置された 2 段式軽ガス銃を用いて、直径 100~330 ミクロンのガラスビーズおよび金属球 (アルミ, SUS, タングステン) のショットガンないしシングルショットの超高速衝突実験を行った。PVDF センサは IKAROS の膜面上と同様に 8CH 搭載されている状態を模擬するため、衝突が起こる標的用センサの他にもダミーセンサ 7 枚を同条件で真空チャンバ内に配置した。衝突速度範囲は 3.6 - 6.6 km/s、衝突角度は正面衝突とし、真空度は 30Pa 以下とする。計測にはフライトモデルと同一ロットの回路部品から制作された ALDN-S フライトスペアを用いた。本スペアを使用することで、宇宙機に搭載されたセンサとの詳細な比較を行うことができる。実験コンフィギュレーションとして、PVDF センサの信号線を真空導入端子を介し、真空チャンバの外に出して、衝突で発生する微小電荷を内部アンプで増幅、電圧値へ変換したのち、衝突時刻、衝突信号強度ピーク値、信号減衰時間を記録した。衝突によるダスト信号のパルス幅は 10 μ s~30 μ s、発生電位 V は数 V であった。実験ではダスト衝突の PVDF 上での衝突位置に対する依存性は見られなかった。さらに、これらの衝突実験後の PVDF の性能評価を行うため、センサ上のクレータ観察を行ったところ、衝突による PVDF センサの機能消失は起こっていないことが分かった。具体的には、センサ両面の導通によるセンサ機能の消失が起こるかを検証したところ、今回行った実験すべてで衝突前後ともに PVDF センサの静電容量はほぼ変化しないことを確認した。つまり、より小さなダストが卓越している宇宙空間でも、ダスト衝突によるセンサ機能の消失が起こる可能性が低いと考えられた。

土星系における小型衛星表層の地質学的特徴と表層進化 Geological features and surface processes on saturnian small satellites

平田 直之^{1*}, 宮本 英昭¹

Naoyuki Hirata^{1*}, Hideaki Miyamoto¹

¹ 東京大学総合研究博物館

¹The University Museum, The University of Tokyo

巨大ガス惑星を回る小型衛星は、微小重力、限られた熱的変成、氷を主成分としているという点で小惑星や彗星とよく似た環境にあるといえ、小天体研究において興味深い対象になると考えられる。同時に小型衛星は、大規模衝突、周囲の環や大型衛星との複雑な相互作用を受けており、巨大ガス惑星の周惑星円盤、衛星や環の形成過程やその後の進化にとって重要な鍵を握っていると見られる。2004年以降、カッシーニ探査機によって土星系の小型衛星の高解像度画像が続々と得られている。我々はこれら小型衛星の解析と調査を行っており、その特色ある表層進化を明らかにしつつけている。この発表では、パン (Pan)、ダフニス (Daphnis)、アトラス (Atlas)、ヤヌス (Janus)、エピメテウス (Epimetheus)、メトネ (Methone)、パレネ (Pallene)、テレスト (Telesto)、カリプソ (Calypso)、ヘレネ (Helene) についての我々の最新の報告を行う。

パン、ダフニス、アトラスは主要環の外縁部に位置し、もっとも土星に近い軌道をもつ衛星群である。形状は円盤型にちかく、環粒子を集積して形成されたと考えられている。表層は極めて滑らかで、一般的な小天体に見られるようなクレーターや溝状構造等の特徴は一切見られない。我々は詳細な画像解析の結果、従来存在しないと考えられていた衛星表層にクレーターが存在することを発見した。さらに衛星表層の静電的性質を調査した結果、衛星表層が常に帯電しており表層の微粒子が運動しつづける可能性があることが分かった。これらの力によって衛星表層が更新され続けている可能性が高いことを明らかにした。

ヘレネは、ディオネと軌道を共有している小型衛星であり、E環の外縁部に位置している。この小型衛星は先行半球と後行半球で全く異なる表層を持つことを発見した。衛星の後行半球はクレーターで飽和している一方で、先行半球側はクレーターが著しく乏しい。また先行半球側は奇妙な筋状構造を多数もつことも分かった。調査の結果、クレーターが乏しい領域と筋が存在する領域はほぼ一致していることがわかった。さらに重力解析の結果、筋状構造は重力方向と一致していること、筋は7度~20度程度の急勾配斜面にしか存在しないことを明らかにした。このためこれら筋状構造は地すべりによって生じたものであることが明らかになった。さらにクレーターの欠乏や地すべりの存在はエンセラダスの放出物の堆積によって説明できることも明らかになった。ヘレネに近い軌道をもつテレスト、カリプソ、メトネ、パレネも同様にエンセラダスの放出物による汚染を受けており、それらの効果によって衛星表層が大きな影響を受けていることを明らかにした。これらの堆積物からエンセラダスの火山活動は極めて短命である可能性が高いということも明らかになった。

ヤヌス、エピメテウスはミマスよりもやや内側に位置する小型衛星である。これらの衛星は軌道を共有しており、定期的に軌道が入れ替わる。表面はクレーターで飽和しており、これらの衛星はかなり古い表面をもつことがわかった。調査の結果、ヤヌスとエピメテウスの表面には明るい領域と暗い領域が存在することが分かった。暗い領域は (i) 低地に存在しており、(ii) その表面は平たく、(iii) 周囲よりも暗く、(iv) 明るい領域との境界は明瞭に分かれており、これらの特徴から池のような姿をしている。暗い領域は明るい領域の中に点在して存在しており、明るい基盤岩の上に暗い物質が堆積することによって生じたものと考えられる。位置を調べた結果、ヤヌスのものは Far side の低緯度に多く存在することがわかった。またエピメテウスのものは南極側や先行半球側に多く存在することがわかった。これらの地域性は、ヤヌスとエピメテウスと軌道を共有している希薄な環との衝突によって説明できることがわかった。おそらく環を介して衛星間で微粒子を交換していると考えられる。天体間でレゴリスを共有し、交換しあっている天体が発見されるのは初めてである。また、スペクトルや形態的な調査の結果、これら暗い物質が土星系の多くの衛星にみられる暗色物質 (ダークマテリアル) である可能性が高いことも明らかになった。この発見は暗色物質による汚染が系最内部にまで至る広域的なものであることを意味していると考えられる。

キーワード: 土星系, 小型衛星, 環, 地質学特徴

Keywords: Saturn system, small satellite, ring, geological feature

低密度弾丸による空隙を持つ表面への強度支配域クレーター形成の模擬実験 Cratering experiments of porous surface in strength regime using low density impactors

原田 竣也^{1*}, 岡本 尚也¹, 青木 隆修¹, 中村 昭子¹

Shunya Harada^{1*}, Takaya Okamoto¹, Takanobu Aoki¹, Akiko Nakamura¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Graduate School of Science, Kobe University

探査機 Cassini により、土星の衛星の高解像度の表面画像が得られるようになり、小クレーターが詳しく観測されるようになった。これら衛星には平均密度が $\sim 1\text{g/cm}^3$ のものがあり、そのため氷岩石天体だと考えられている。例えば、土星の衛星の Iapetus は、平均密度が 1.1g/cm^3 程度であり、その地表は Cassini が最高 10m/pixel の解像度で撮影している。

このような天体の表面はレゴリス層で覆われていると考えられている。レゴリス層は衝突によるイジェクタなどの破片物質が降り積もったものであり、その過程で空隙を持つと考えられる。レゴリス層が氷微粒子を含む場合は、焼結作用によって強度を持つようになると考えられる。焼結は衝突による圧密や昇温でより進行する可能性がある。

そこで本研究では、空隙を持った天体表面の強度支配域クレーターの形成過程を調べるため、標的と弾丸を作成し衝突実験を行った。空隙と強度を持った標的を作成するため、粒径 55 μm の中空ガラスビーズを焼結させた。焼結温度を変えることで、この焼結体の空隙率を 73-94%、強度を 0.6-1.9MPa で変化させた。弾丸には、天体と同様の物質が衝突することを想定し、直径 3mm のガラスビーズ焼結体 ($\sim 1.3\text{g/cm}^3$) や多孔質アルミナ球 ($\sim 1.8\text{g/cm}^3$) を使用し、神戸大学の小型ガス銃を用いて 100-300m/s で標的に衝突させた。

標的の空隙率が 94% では貫入孔が形成されたが、空隙率が小さくなるに連れて孔は浅くなり、74% ではクレーターに近い形となった。一方、今回の実験範囲で形成された孔の直径はいずれにおいても弾丸とほぼ同じ大きさであった。

形成された貫入孔やクレーターの形状やサイズを、過去の研究結果と比較し、空隙を持つ天体表面へのクレーター形成過程について議論する。

キーワード: 空隙率, 強度, 氷岩石天体, 衛星, 衝突実験

Keywords: porosity, strength, ice-rock body, satellite, impact experiment

はやぶさ帰還試料の国際公募分析の現況

Present status of international announcement of opportunity for research of Hayabusa-returned samples

矢田 達^{1*}, 安部 正真¹, 岡田 達明¹, 上梶 真之¹, 唐牛 謙¹, 石橋 之宏¹, 八嶋 彰吾², 藤本 正樹¹, 吉川 真¹

Toru Yada^{1*}, Masanao Abe¹, Tatsuaki Okada¹, Masayuki Uesugi¹, Yuzuru Karouji¹, Yukihiro Ishibashi¹, Shogo Yakame², Masaki Fujimoto¹, Makoto Yoshikawa¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東京大学大学院理学系研究科

¹ Japan Aerospace Exploration Agency, ² Graduate school of Science, University of Tokyo

2010年6月の小惑星探査機はやぶさの再突入カプセル地球帰還以降、JAXA 惑星物質キュレーションセンターでは、カプセルから取り出されたサンプルキャッチャー内に捕獲されていた粒子の回収初期記載を行っている [1]。

初期記載されたケイ酸塩鉱物粒子の一部について2011年に初期分析を実施した結果、それらが平衡化の進んだLLコンドライト隕石と同様の鉱物化学・酸素同位体組成を示すこと [2-5]、ごく表層に宇宙風化の痕跡が見られること [6]、希ガス同位体組成から粒子が小天体表面で宇宙線に暴露されており、その期間が短い(300万年以下) ことなどが分かった [7]。これらの成果は回収されたケイ酸塩鉱物粒子が小惑星イトカワ起源であることを示している。

2013年2月14日現在で回収された粒子数は430個にのぼり、その内約3/4が主にケイ酸塩鉱物からなるイトカワ起源の粒子だった。まだサンプルキャッチャーからの完全な粒子回収は完了しておらず、2015年度半ばまでには回収試料の全量把握を終える計画で作業を進めている。

探査機はやぶさの打ち上げ前にNASAとの間に交わした合意文書では、粒子の内15%は国際公募研究に提供されることになっており、JAXAでは国際公募分析委員会を発足して、2012年1月から3月にかけて1回目の国際公募研究の応募を行い、6月に7カ国17の研究グループが選抜され、2012年11月にかけて65個の粒子の配布を行った。現在、ほとんどの研究グループで分析を進めている所で、その成果は今年10月にJAXA相模原キャンパスで開催されるはやぶさ帰還試料に関するシンポジウムで発表される予定である。また、2013年1月から3月にかけて第2回目の国際公募分析の応募が行われ、5月中旬には選抜された研究グループが発表され、8月末にかけて配布が行われる予定である。

引用文献: [1] Yada T. et al. (2013) Meteoritics Planet. Sci., in print. [2] Nakamura T. et al. (2011) Science, 333, 1113. [3] Yurimoto H. et al. (2011) Science, 333, 1116. [4] Ebihara M. et al. (2011) Science, 333, 1119. [5] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science, 333, 1125. [6] Noguchi T. et al. (2011) Science, 333, 1121. [7] Nagao K. et al. (2011) Science, 333, 1128.

キーワード: はやぶさ, イトカワ, 小惑星, 国際公募分析, 隕石, LL コンドライト

Keywords: Hayabusa, Itokawa, curation, international announcement of opportunity, meteorite, LL chondrite

主成分分析を用いたイトカワ表面スペクトルの解析 Analysis of The Asteroid Itokawa Surface Spectra Using Principal Component Analysis

古賀 すみれ^{2*}, 伊佐敷 一裕¹, 杉田 精司²
Sumire Koga^{2*}, Kazuhiro Isashiki¹, Seiji Sugita²

¹ 東京大学理学系研究科, ² 東京大学新領域

¹Dept. Sci., Univ. Tokyo, ²Dept. Complexity Sci. and Engr. Univ. Tokyo

主成分分析を用いたイトカワ表面スペクトルの解析

目的

2003年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された可視分光カメラ AMICA は、約1ヶ月間滞在したホームポジションで70cmの高い空間分解能をもち、7バンドでイトカワの全面を撮像した。

本研究では、AMICAの画像データを用いて主成分分析(PCA)によりイトカワ表面スペクトルの解析をおこなった。PCAには、表面スペクトルの地域差や分布を定量的に評価しやすく、網羅的に解析できる利点がある。さらに、そもそも小惑星のスペクトル分類自体が反射スペクトルのPCAに基づいており、1つの小惑星上の反射スペクトルに対して同様の解析を行って比較することは意義が大きい。バンド分光ではあるが、全表面の詳細なデータが得られている小惑星表面に対して同じ解析をおこない、どのような主成分が出るかを求めることは有意義である。

このような解析方法は、現在プロジェクト化されている「はやぶさ2」の解析でも有効性が期待される。本研究は、イトカワのスペクトル特性について新しい特徴を見つけることを目指すと同時に、はやぶさ2のデータ解析に備えることを目的とする。

解析手法

ほぼ同じ探査機位置から撮像した7バンドの画像セットを用いた。画像校正をおこない、位置合わせをしてから解析をおこなった。

校正・位置合わせの手順

(1) ダークや smear 補正、ホットピクセルの除去の必要性を確かめた。ここではこれらの補正は必要なかった [2]。次に対応するバンドの flat 画像で割った。

(2) 比画像をとると、2枚の画像のわずかなずれにより、岩の影などで異常値をとる。これを少なくするように、平行移動によって位置合わせをした。このとき0.1ピクセル単位で移動した。しかし、わずかな回転などが必ず含まれるため、平行移動で完全な位置合わせをすることはできない。そこで、隣ピクセルと一定以上の差をもつピクセルは、解析の段階で排除してこの異常値による影響を防いだ。

解析の手順

ほぼ同じ位置から撮像したイトカワ半球の7バンドの画像セットを、そのうちの1つのwバンド画像で割った、6個の比画像に対してPCAをおこない、主成分の係数と寄与率を求めた。この解析を他の画像セットでもおこなった。並行して、イトカワ半球の全点のCvとRw/Rb(反射スペクトルの曲率と傾き)をプロットし、相関を確かめた。Cv、Rw/Rbはそれぞれ宇宙風化の指標のひとつとされる [1]。

結果・議論

CvとRw/Rbとは宇宙風化と一致する正の相関がみられた。これは、本研究で行ったデータ解析が正しく行われていたことを示している。ただし相関はゆるやかで、分布の広がりをもつ意味について検討する必要がある。

解析した画像セットにもよるが、第1、第2主成分(PC1, 2)のもつ寄与率はそれぞれ60-70%、20-30%であった。それぞれの主成分が何を示すのか吟味した。PC1はスペクトルの形状の特徴および、宇宙風化が大きく異なっている地点との対応関係との比較などから、宇宙風化の強さを示すと推測された。宇宙風化がイトカワの反射スペクトル変化の最も卓越した成分であるという先行研究 [1] の知見とも整合的である。一方PC2が何に対応するのかは特定できていない。組成的な不均一性、粒子の大きさ、あるいはノイズ、位置合わせの不完全性などが考えられる。このPC2の意味は今後の重要な課題である。

また、PC1, 2プロットでスペクトルは1つのクラスターとなったが、Black Boulder (イトカワの「頭」に位置する黒い岩、[3]) はメインのクラスターから外れており、イトカワ表面上に卓越する反射スペクトル変化の要因と大きく異なるプロセスないし組成を反映している可能性が高いことが示唆される。

U07-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月19日 18:15-19:30

結論・今後の課題

PCA 解析からは、宇宙風化のイトカワ表面上で卓越していることが強く示唆する結果を得た。また、PCA は、Black Boulder を特異な点として捉えることができることも確認された。これらの結果は、データの分布の主成分抽出、網羅的な分析という PCA の有効性を示すものである。

一方寄与率 20-30% をもつ PC 2 の意味については特定できていない。これが何を意味するのか究明する必要がある。

参考

[1] Ishiguro et al. 2007, MAPS 42, 1791.

[2] Ishiguro et al. 2010, Icarus 207, 714.

[3] Hirata & Ishiguro 2011, 42nd LPSC (2011).

キーワード: 小惑星, 可視分光, 宇宙風化

Keywords: asteroid, visible spectroscopy, space weathering

はやぶさ2搭載の可視分光カメラ ONC による科学観測計画 Scientific observation plan for Hayabusa-2 visible multi-band cameras

杉田 精司^{1*}, 本田 理恵², 亀田 真吾³, 諸田 智克⁴, 澤田 弘崇⁵, 本田 親寿⁶, 鈴木 秀彦³, 小川 和律⁵, 白井 慶⁵, 山田 学⁷, 中村 良介⁸, はやぶさ2 ONC サイエンスチーム⁵
Seiji Sugita^{1*}, Rie Honda², Shingo Kameda³, Tomokatsu Morota⁴, Hiroataka Sawada⁵, Chikatoshi Honda⁶, Hidehiko Suzuki³, Kazunori Ogawa⁵, Kei Shirai⁵, Manabu Yamada⁷, Ryosuke Nakamura⁸, Hayabusa-2 ONC Science Team⁵

¹ 東京大学, ² 高知大学, ³ 立教大学, ⁴ 名古屋大学, ⁵ 宇宙航空研究開発機構, ⁶ 会津大学, ⁷ 千葉工業大学, ⁸ 産業総合研究所
¹University of Tokyo, ²Kochi University, ³Rikkyo University, ⁴Nagoya University, ⁵JAXA, ⁶Aizu University, ⁷Chiba Institute of Technology, ⁸AIST

はやぶさ2 探査は始源的天体からの試料回収探査を基本目的としている。どのような地質調査にも言えることだが、採取試料の産状や周辺地域の地質構造が明らかにされていなければ、試料の精密分析結果を正確に解釈することはできない。この周辺地域の地質構造の観察を行うのが、はやぶさ2 に搭載される各種リモセン機器群の最大の役割である。

その中でも ONC は3つのカメラを持ち、多種多様な科学観測を行う(図1)。その内容は、(a) 形状・形態観察(小惑星回転運動捕捉を含む)と(b) マルチバンド分光観察に大別される。

まず、(a) の形状・形態観察は、天体の平均密度(重力計測と組み合わせによる)、内部の密度不均質(慣性主軸と自転軸の一致・不一致度の観測から)、衝突や破壊・加熱履歴(表面粒子のサイズや形状の空間分布などから)、SCIによる人工クレーター形成の観測など様々な科学観測の実現に役立つ。また、全球形状観測や局所地形観測は、タッチダウンの安全性を確保するという工学的観点からも非常に重要である。ONCには、このように多様な科学目標があるが、実際に行う観測と解析は、小惑星の全球形状モデルや局所地形モデルを精密に作成することと、小惑星全体の回転運動を観測することに集約される。これらの観測・解析は、はやぶさ初号機で実施された観測と基本的に同様である。初号機での形状観測から直径1 kmに満たない小惑星イトカワが衝突破片の再集積物(rubble pile)であることを示す重要観測データを得られたことはよく知られている。

はやぶさ2計画では、探査小惑星のランデブー期間を初号機に比べて大幅に延長し、はるかに詳細な形状・形態観察の実現を目指している。また、形状モデル生成についても初号機での経験を踏まえて詳細な見直しを行い、精密化・迅速化を目指している。しかし、原理的な面において、その目的および観測方針、必要機器性能には大幅な変更はない。

その一方で、物質科学的な見地に立てば、「はやぶさ」初号機の探査対象天体のイトカワ(S型小惑星)と「はやぶさ2」が狙う1999JU3(C型小惑星)では月と火星ほどに異なる。星の小ささから一括りに小惑星と総称されるが、S型小惑星とC型小惑星では、それほどまでに分光学的特徴が異なる。そのため、S型小惑星を狙った「はやぶさ」初号機とC型小惑星を目指す「はやぶさ2」では、分光観測の目的も内容も大きく異なる。特に、月と同様に紫外領域と1 μm近辺において強い吸収帯を持つS型小惑星と異なり、C型小惑星は紫外域から近赤外域にかけて特徴に乏しい平坦なスペクトル形状を持つ。その平坦なスペクトルの上に、紫外域や0.7 μm近辺に弱い吸収帯(いずれも含水鉱物由来と推定されている)が乗った状況になっており2)、この微弱な吸収帯の強度や形状から物質分布を調べることが必要である。この状況は、特徴に乏しい無水酸化鉄ダストの中から含水鉱物を発見し火星表層研究に大きな役割を果たした火星リモセン観測と非常に似通っている。

含水鉱物の分光観測については、実は非常に強いOH吸収帯の存在する3 μm帯の観測が可視光観測より優れている。はやぶさ2にも3 μm帯域を狙ったNIRS3が搭載予定である。しかし一般に、この波長帯の検出器に比べて可視カメラの空間分解能は圧倒的に高い。この可視カメラが持つ高い空間解像度を利用して、1999JU3のタッチダウン予定地域の微小スケールの不均一度を把握することは、最適なタッチダウン地点選択の観点からも、実際のタッチダウン地域の産状記載の観点からも非常に重要である。本講演では、1999JU3表面に期待される可視光領域の分光特性に基づいて検討しているONCによるマルチバンド分光観測計画の概略を紹介する。

キーワード: 小惑星探査, 始源的天体, はやぶさ2, リモートセンシング観測, 反射分光法, 機器開発

Keywords: asteroid mission, primitive bodies, Hayabusa-2 mission, remote sensing, reflectance spectroscopy, instrument development

小惑星探査機はやぶさ 2 ONC の較正試験について Calibration of Asteroid Explorer Hayabusa-2 ONC (Optical Navigation Camera)

佐藤 允基^{1*}, 武井 亮斗¹, 長 勇一郎², 鈴木 秀彦¹, 山田 学³, 亀田 真吾¹, はやぶさ 2 ONC チーム⁴
Masaki Sato^{1*}, TAKEI, Akito¹, Yuichiro Cho², Hidehiko Suzuki¹, Manabu Yamada³, Shingo Kameda¹, Hayabusa2 ONC team⁴

¹ 立教大学, ² 東京大学, ³ 千葉工業大学, ⁴ 宇宙航空開発研究機構

¹Rikkyo University, ²The University of Tokyo, ³Chiba Institute of Technology, ⁴JAXA

はやぶさ初号機は 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。その後継機であるはやぶさ 2 では、初号機で実証された技術を基に C 型小惑星 1999JU3 を目指す。

S 型小惑星と C 型小惑星では熱変性度が異なる。C 型小惑星の方が熱変性は進んでいないと考えられており、その点で C 型小惑星の方がより始原的であり、有機物や含水鉱物を多く含んでいる可能性がある。そこで、はやぶさ 2 は 1999JU3 の表面にあるとされている熱変性の進んでいない試料のサンプルリターンを行う。

1999JU3 の地上観測結果から含水鉱物の存在を示す 700nm の吸収帯が確認された (Vilas, 2008)。しかし表面全域には含水鉱物が分布していない可能性があるため、着陸地点を選定するためには打ち上げ後にも 700nm の吸収帯の有無について観測を行う。そして含水鉱物が含まれる地域を特定する必要がある。

着陸地点選定のための観測は ONC によって行われる。ONC とは Optical Navigation Camera の略で光学航法カメラのことをいう。ONC には ONC-W1、ONC-W2 という広角カメラと、ONC-T という望遠カメラがある。ONC-T には 7 枚のバンドパスフィルター (390nm、480nm、550nm、589.5nm、700nm、860nm、950nm) と 1 枚のガラスからなるフィルターホイールがついている。このフィルターホイールを回転させることで分光観測が可能となり、これにより着陸地点の選定を行う。

今回我々は ONC 用に較正用カメラ・フィルターを用意し、フライトモデルでの ONC 光学較正試験に向けて本番と同様の方法で予備実験を行った。予備実験は小惑星の輝度計算、フィルターの透過率測定を行った上で、感度較正、フラット特性、PSF(Point Spread Function) を測定した。そして、これらの予備実験を踏まえてフライトモデルの光学較正試験に参加した。その結果を予備実験内容とともに報告する。

InAs 検出器低温性能評価データに基づくはやぶさ2近赤外分光計の観測性能検討 An observation performance study of NIRS3 on Hayabusa-2 based on low temperature examination data for InAs detector

仲内 悠祐^{1*}, 北里 宏平², 岩田 隆浩³, 松浦周二³, 大竹 真紀子³, 安部 正真³

Yusuke Nakauchi^{1*}, Kohei Kitazato², Takahiro Iwata³, Shuji Matsuura³, Makiko Ohtake³, Masanao Abe³

¹ 総合研究大学院大学物理科学研究科, ² 会津大学, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹The Graduate University for Advanced Studies School of Physical Sciences, ²University of Aizu, ³JAXA

次期小惑星探査機はやぶさ2搭載予定の近赤外分光計(NIRS3)は、3 μm帯の太陽光反射スペクトルを用いて含水量や鉱物組成の情報を取得することを目指している。炭素質コンドライトやそれらが含む主要鉱物のスペクトル解析から、ヒドロキシル基(-OH基)の伸縮振動に由来する吸収特徴が2.7 μm付近にみられ、水分子(H₂O)の変角振動に由来する特徴が1.9 μm付近、2.9-3.0 μmに存在することが知られている。1.9 μmでの特徴は3 μm帯のものに比べると吸収強度が弱く、さらに熱に弱いとされている。一方、3 μm帯の吸収特徴は比較的熱に強いことが実験室での加熱実験で示されている。これらの特徴から、NIRS3のサイエンス目標のフルサクセスとして挙げられている「水・含水鉱物量の推定」のためには、3 μm帯における全体的な吸収特徴に加え、比較的細かい吸収特徴を抽出することが必要となってくる。これらの特徴抽出のために、目標SN比を50以上と定めた。

SN比を決める支配的要因の一つが検出器の性能である。NIRS3で使用されるインジウムヒ素(InAs)検出器素子の性能データは、検出器メーカーで室温および-20 °Cでのデータが取得されているものの、NIRS3での使用環境である-80 °C

付近での低温特性が取得されていない。そこで我々は宇宙科学研究所の恒温槽を用いて実際の動作環境をできる限り再現し、検出器の性能を測定して実環境でのSN比の評価を行った。使用した検出器は、エンジニアリングモデル(以下EM)とフライトモデル(以下FM)である。小惑星の光の模擬には黒体炉を用いた。

本発表以前のNIRS3の観測性能検討はEMの検出器データに基づいており、目標SN比の達成が厳しい状況であった。SN比が厳しいの主な要因は、検出器におけるRMSノイズ(暗出力の揺らぎと読み出しノイズが支配的)が高いことである。そのためSN比50以上を実現するには検出器ゲインの変更やスタック回数、積分時間の増加などのデータ取得法の改良、またグレーティングなど光学系の設計や検出器動作温度の変更などRMSノイズを統計学的に抑えることが計画されていた。

この度FMの検出器が納入されその性能評価を行ったところ、EM検出器に比べ特性がよくなっていることがわかった。FMの検出器では、RMSノイズに加え検出器の画素間感度偏差や暗時の出力が小さく、出力の積分時間に対するリニアリティーが良いことがわかった。今回の発表では、EMの検出器とFMの検出器の性能比較を行い、ミッションで実際に得られるであろうSN比について検討する。

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

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

はやぶさ2 探査機搭載 LIDAR による C タイプ小惑星のアルベド計測 Measuring Albedo of C-type Asteroid with LIDAR onboard HAYABUSA2 Spacecraft

阿部 新助^{1*}, 吉田 二美², 野田 寛大², 山田 竜平², 佐々木 晶², 並木 則行³
Shinsuke Abe^{1*}, Fumi Yoshida², Hiroতোমo Noda², Ryuhei Yamada², Sho Sasaki², Noriyuki Namiki³

¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科, ² 国立天文台, ³ 千葉工業大学惑星探査研究センター

¹Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

JAXA/ISAS の小惑星サンプルリターン・ミッション「はやぶさ-2」は、2014年打ち上げられ、2018年に近地球小惑星(162173) 1999 JU3の探査を行い、2020年に地球に帰還する予定である。LIDAR(レーザー高度計)は、はやぶさ2に搭載される5つの機器のうちの1つで、探査機からターゲット小惑星表面までの距離の計測に使われる。高度25kmから30mまでのレンジを計測するパルス・レーザー光の波長は、波長1.06 μm。LIDARは、探査機のナビゲーション装置としてだけでなく、地形、アルベド(反射率)、浮遊ダスト、重力、形状の計測にも使われる。

1999 JU3や他のメインベルト小惑星の地上分光&撮像観測結果、炭素質コンドライトの室内実験などを考慮しながら、はやぶさ2探査機に搭載されるLIDARを使ったCタイプ小惑星のアルベドに関する科学的観測項目を議論する。例えば、表面アルベドの異方性、宇宙風化や関連するメインベルト小惑星族など。また、はやぶさ-1探査機搭載のLIDARとNIRS(近赤外線分光器)で得られた、Sタイプ小惑星イトカワのアルベド異方性についても示す。

キーワード: 小惑星, はやぶさ, レーザー高度計, アルベド, 宇宙風化, 炭素質コンドライト
Keywords: asteroids, Hayabusa, LIDAR, albedo, space weathering, carbonaceous chondrites

はやぶさ2搭載小型ランダー MASCOT の開発と現状 Development of MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) small lander on Hayabusa2

岡田 達明^{1*}, Tra-Mi Ho², MASCOT チーム²
Tatsuaki Okada^{1*}, HO, Tra-Mi², MASCOT team²

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² ドイツ航空宇宙センター

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ²German Aerospace Center

はやぶさ2では小型ランダー MASCOT による小惑星表面上での探査を実施する。C型小惑星 1999JU3 の表層の地形、微細な構造・組織・組成、表層の熱物性や残留磁気などの調査によって微小なC型小惑星のより詳細な素性を調べる。小型ランダーの開発の現状と科学目標について報告する。

はやぶさ2では10kg級のランダー MASCOT をドイツ宇宙機構 DLR が中心となり、宇宙航空研究開発機構 JAXA やフランス宇宙機構 CNES と協力のもとで科学探査ロボットとして開発を進めている。搭載観測機器は約3kgであり、多色の広角多色カメラ CAM、可視・近赤外分光顕微鏡 MicrOmega、他バンド熱放射計 MARA、磁力計 MAG をする。寿命は1次電源で決まり、ノミナル11時間、最長16時間(2小惑星日)である。MASCOTは2011年12月に探査機とのインターフェース確認を済ませ、2012年6月に事前設計審査を受けて詳細設計フェーズに入り、プロトモデルによる設計確認を実施途上であるが、各種環境試験や電気動作試験、分離試験等を実施済みである。はやぶさ2の一次噛合せ試験に参加することによってインターフェース成立性を検証する。2013年に詳細設計審査を受けてフライトモデルの製作に着手する。

小型ランダーの最重要目的は、表層における高解像度・微視的な高精度の地形や物質の観察や分析である。特にC型小惑星が対象であるため、水や有機物と無機鉱物との共存状態や相互作用の状態をその場で観察・分析することが最重要である。表面にいて直接接触するランダーゆえに可能となる表層物理状態の探査や内部構造探査も重要であるが、限られたリソース内で実現することは困難である。掘削孔の構造や地下物質(宇宙風化を受けていない試料、地下の氷や有機物など)の探査はC型小惑星の水と有機物の関連性を調べる探査として極めて重要であるが、ランダー自身の長期間の寿命や孔への誘導制御という技術課題があり、実現性の検討を進めている。なお、小型ランダーの主要観測課題は次のように整理できる。表面での科学観測(Stand-alone surface science): 地形や物質の高解像度撮像や微視的スケールでの観測、物質の組成や組織のその場分析、内部構造の探査を行う。地質学的産状把握(Geological context): 帰還サンプルやサンプル回収地域付近の産状について情報を収集する。指標情報(Groundtruth): リモート観測データを解析するために必要な表層の物理状態、典型的な粒径、物質の元素・鉱物組成、物性についての情報を取得する。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 着陸機, 分光顕微鏡, 熱放射計

Keywords: Hayabusa2, asteroid, lander, hyperspectral microscope, thermal radiometer

微小重力ローバーの力学シミュレーション Dynamical simulation of microgravity rovers

原田敏宏¹, 北里 宏平^{1*}
HARADA, Toshihiro¹, Kohei Kitazato^{1*}

¹ 会津大学
¹University of Aizu

We developed a dynamics simulator of microgravity rover for small body exploration. Surface exploration using rovers are expected to return scientific discoveries yet to be made, and for them the global and long-term operations and tactical planning are needed. However, gravity fields of small bodies are not uniform due to their irregular shapes so that it is difficult to analytically predict the rover's motion. Thus, physical-based simulation for microgravity rovers is required.

We designed the simulator to have functions to estimate the rover trajectory based on rigid-body dynamics and to visualize the trajectory data on the shape model of small body. The graphical interface has been built in to support the usability. In addition, we performed a comparative experiment in laboratory to verify the simulation of rigid-body's rebound motion.

Finally we examined characteristics of rover motion using Itokawa's shape model. As a result, we found that the rover's motion would converge for shape models of less than approximately 5-m resolution.

Keywords: simulation, dynamics, rover, Hayabusa-2

小型キックステージを用いた低コスト深宇宙探査ミッションの可能性について A study on a low-cost deep space exploration mission utilizing a small kick stage

池永 敏憲^{1*}, 歌島 昌由¹, 石井 信明¹, 吉川 真¹, 平岩 徹夫¹, 野田 篤司¹

Toshinori Ikenaga^{1*}, UTASHIMA, Masayoshi¹, ISHII, Nobuaki¹, Makoto Yoshikawa¹, HIRAIWA, Tetsuo¹, NODA, Atsushi¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹Japan Aerospace Exploration Agency

本研究は、小型キックステージを用いたデュアルローンチシステム、及び、「惑星間待機軌道」の概念を導入した自在性の高い深宇宙探査軌道の設計手法を用いることで、深宇宙探査ミッションの低コスト化を実現することを目的とする。

本研究では、静止トランスファ軌道(GTO)に投入される主ペイロードに、質量500kgの深宇宙探査機、及びwet質量300kgの小型キックモータから構成される、総質量800kgのデュアルローンチシステムが副ペイロードとして相乗りし、GTO投入後、小型キックモータによるVを用いて、一旦、軌道エネルギーC3がほぼゼロの軌道に遷移後、探査機搭載の電気推進システム(「はやぶさ2」相当のスペックを仮定)を用いて目標天体(本研究では火星に設定)に向かう状況を仮定した。打ち上げロケットとしては、日本の基幹ロケットH-2Aを想定した。H-2A 206型を用いるとした場合、GTO投入能力は6tonであるため、本研究の打ち上げコンフィギュレーションの場合でも、主ペイロード質量として5ton程度は確保できる。

本研究では、前述の打ち上げコンフィギュレーションを用いて、小惑星探査機「はやぶさ2」相当の深宇宙探査機を火星に到達できることを軌道シミュレーションにて確認した。また、本打ち上げ方式を採用する場合、輸送コストの大幅な削減は期待できるが、深宇宙探査機にとってクリティカルである、ローンチウィンドウに関しては、副ペイロードである深宇宙探査機側には自由度はほとんどないと考えられる。この問題を解消する方法として、本研究では、軌道エネルギーC3がほぼゼロの軌道を「惑星間待機軌道」として適切に利用することを提案する。これにより、ローンチウィンドウを拡大できることをシミュレーションにて確認した。その結果を報告する。

キーワード: 小型キックステージ, デュアルローンチシステム, 低コスト深宇宙探査, 電気推進, 惑星間待機軌道

Keywords: small kick stage, dual launch system, low-cost deep space exploration, electric propulsion, interplanetary parking orbit

Asteroid Shape Reconstruction using Structure from Motion Asteroid Shape Reconstruction using Structure from Motion

Yohei Mori^{1*}, Naru Hirata¹, Hirohide Demura¹

Yohei Mori^{1*}, Naru Hirata¹, Hirohide Demura¹

¹The University of Aizu

¹The University of Aizu

A shape model of an asteroid is important for science analysis on exploring missions. In the Hayabusa mission, three models of asteroid Itokawa were reconstructed by different methods [M. Maruya, 2006], [H. Demura, 2006], [R. Gaskell, 2006]. A more precise model was reconstructed that have 3 millions or more polygons used multi-image photogrammetry after the mission [M. Maruya, 2006]. For the Hayabusa 2 project, a shape model of an asteroid 1999JU3 is also required. It must be investigated what reconstruction method is good. We focus on a method called Structure from motion (SfM) to achieve it. An open-source software Bundler [N. Snavely, 2006] implements SfM and Bundle adjustment [B. Triggs, 1999]. SfM is a method which uses multiple images to estimate real space coordinates of features in images and camera positions. Bundle adjustment is a kind of optimization method for non-linear model to estimate parameters on a geometric model precisely. A more precise result and less manual works are expected compared with ones in the Hayabusa mission by using and customizing the software. We reconstructed a shape model of Itokawa from 169 AMICA Images using this software. As a result, a sparse shape model is reconstructed successfully around equatorial region. However the number of points of polar regions are quite less than ones of equatorial region. This is caused by an insufficiency of images captured around a pole. We experimented this polar area observations using a shape model presented by [R. Gaskell, 2006]. In this experiment, we rendered the model and take images around of it with some longitude variations. One of the dataset is consists of images view from 30 degree longitude. The polar region is reconstructed successfully by inputting the dataset. And we also experimented with 70 degree and 80 degree longitude datasets for confirming the availability of Structure from Motion in the case of the rotation axis of 1999JU3 is parallel to the plane of revolution. The result was also good. Structure from Motion is useful for reconstructing asteroid shape model from multiple images. We are examining a method for quantitative evaluation of these results.

キーワード: Hayabusa, Hayabusa 2, 3D Shape Reconstruction

Keywords: Hayabusa, Hayabusa 2, 3D Shape Reconstruction

はやぶさ2における重力推定について Gravity Estimation in Hayabusa2 Mission

池田 人^{1*}, 松本 晃治², はやぶさ2 LIDAR サイエンスチーム³, はやぶさ2 アストロダイナミクスチーム⁴
Hitoshi Ikeda^{1*}, Koji MATSUMOTO², Hayabusa2 LIDAR Science Team³, Hayabusa2 Astrodynamics Team⁴

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 国立天文台, ³ はやぶさ2 LIDAR サイエンスチーム, ⁴ はやぶさ2 アストロダイナミクスチーム

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³Hayabusa2 LIDAR Science Team, ⁴Hayabusa2 Astrodynamics Team

The Japanese asteroid explorer Hayabusa2 will be launched in the mid-2010s to return samples from C-type near earth asteroid 1999JU3. During the rendezvous phase (i.e., proximity operation phase), we will make scientific observations to estimate physical parameters (e.g., gravity field, shape, pole direction, spin-rate, ephemeris) of the target body, which are very important not only for its scientific investigation but also for the spacecraft navigation. In particular, the mass is essential to perform a stable touch down sequence to collect samples from the asteroid's surface. We will attempt to estimate the gravity field of the target body using earth-based radiometric tracking measurements (2way Doppler and range) and spacecraft-based measurements (information from optical navigation camera and laser altimetry) with global parameter estimation technique. As the first step for the gravity field estimation, we performed a simulation study about mass estimation under simple configuration and evaluated the relation between the quality and quantity of measurements and the accuracies of estimation results. The detectability of the low degree and order gravity field coefficients is also investigated.

キーワード: 重力, 軌道, 小天体

Keywords: gravity, orbit, small-body