

## はやぶさ2搭載中間赤外カメラによる科学観測 Thermal infrared (TIR) imager onboard Hayabusa-2

岡田 達明<sup>1\*</sup>, 田口 真<sup>2</sup>, 福原 哲哉<sup>3</sup>, 中村 良介<sup>5</sup>, 今村 剛<sup>1</sup>, 関口 朋彦<sup>6</sup>, 長谷川 直<sup>1</sup>, 和田 武彦<sup>1</sup>, 松永 恒雄<sup>7</sup>, 小川 佳子<sup>4</sup>, 荒井 武彦<sup>8</sup>

Tatsuaki Okada<sup>1\*</sup>, Makoto Taguchi<sup>2</sup>, Tetsuya Fukuhara<sup>3</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>5</sup>, Takeshi Imamura<sup>1</sup>, Tomohiko Sekiguchi<sup>6</sup>, Sunao Hasegawa<sup>1</sup>, Takehiko Wada<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>7</sup>, Yoshiko Ogawa<sup>4</sup>, Takehiko Arai<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 立教大学, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 会津大学, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所, <sup>6</sup> 北海道教育大, <sup>7</sup> 国立環境研究所, <sup>8</sup> 国立天文台

<sup>1</sup> ISAS/JAXA, <sup>2</sup> Rikkyo University, <sup>3</sup> Hokkaido University, <sup>4</sup> University of Aizu, <sup>5</sup> AIST, <sup>6</sup> Hokkaido University of Education, <sup>7</sup> NIES, <sup>8</sup> NAOJ

「はやぶさ2」では、小惑星表面の物性調査を遠隔的に行うために中間赤外波長での熱赤外カメラ(TIR)を搭載する。本機器は金星大気探査機「あかつき」に搭載される非冷却ボロメータ型中間赤外カメラLIRを小惑星探査用に適用する。LIRの仕様がほぼ目的と合致していることに加え、「はやぶさ2」の開発スケジュールが極めて短いために実績のある機器を利用するのが現実的だからである。

小惑星表面の昼側の温度は太陽光照射によって暖められ、熱物性にもよるが太陽直下点では350K、周辺部でも250Kにまで上昇することから、波長10 $\mu$ m程度の熱輻射が常に発生する。中間赤外カメラは小惑星表面からの熱輻射を高い空間解像度で2次元撮像する世界初のカメラとなる。小惑星の自転に伴う各地域の温度の時間変化を調べることにより、各地域の温度環境や、表面物質の熱慣性を調べることができる。熱慣性は主に表面の物質の平均粒度や空隙率を反映するもので、砂状、礫状、岩塊状などの区別を行うことができる。中間赤外カメラによる撮像は温度(熱放射)の違いを捉えるものであるが、可視カメラと相補的である。特にC型小惑星は低反射率で全体に暗い表面をしており、可視光では表面地形の判別に必ずしも有利ではない(「はやぶさ2」は主に太陽高度の大きい位置からの観測になる)。小惑星表面の地形、物性、物質の特徴を可視多色カメラと同時に取得することにより、多くの知見を得ることが可能になる。

本機器は科学観測のみならず、「はやぶさ2」の目指す小惑星サンプルリターンのためのサンプル採取地点を選定するための表層状態の情報、およびタッチダウン運用のための表面温度分布を事前に知るために必須な観測機器である。

本発表では、中間赤外カメラによる科学目標、観測シーケンスの検討、および機器仕様の検討の状況について報告する。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 熱物性, 中間赤外カメラ, リモートセンシング, 熱慣性

Keywords: Hayabusa2, asteroid, thermal property, mid-infrared imager, remote sensing, thermal inertia

PPS022-02

会場:国際会議室

時間:5月26日 16:45-17:00

## はやぶさ2搭載レーザ高度計の科学 Scientific targets of the LIDAR onboard Hayabusa2

平田 成<sup>1\*</sup>

Naru Hirata<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 会津大学

<sup>1</sup> Univ. of Aizu

小惑星探査機はやぶさ2に搭載されるレーザ高度計(LIDAR)の科学目標について議論する。LIDARはカメラなどと連携し、探査機の航法誘導を行うバス機器であるが、科学的観測にも用いられる。LIDARの科学的目標は以下の通りである。1) 探査機の小惑星に対する相対位置を正確に決定し、他の機器のデータ解析のための基盤を提供する。2) 探査機の自由落下中の位置履歴などを記録することで、小惑星の重力場計測を行い小惑星の質量を決定する。これと形状モデルから求めた小惑星の体積とあわせて小惑星の密度と空隙率を推定し、内部構造の手がかりを得る。3) 小惑星表面からの反射光の強度を測定することで、1 $\mu$ mにおける小惑星のアルベドを推定する。

キーワード: 小惑星, LIDAR, はやぶさ2, 重力場, 密度, 内部構造

Keywords: asteroid, LIDAR, Hayabusa 2, gravity field, density, internal structure

## 「はやぶさ2」での小型ローバ・ランダによる表面科学観測 Surface science with small landing robots in Hayabusa-2

岡田 達明<sup>1\*</sup>, 出村 裕英<sup>2</sup>, 平田 成<sup>2</sup>, 久保田 孝<sup>1</sup>, 吉光 徹雄<sup>1</sup>, ランダ・ローバ サブチーム<sup>1</sup>  
Tatsuaki Okada<sup>1\*</sup>, Hirohide Demura<sup>2</sup>, Naru Hirata<sup>2</sup>, Takashi Kubota<sup>1</sup>, Tetsuo Yoshimitsu<sup>1</sup>, Lander-Rover Subteam<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 会津大学

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>University of Aizu

「はやぶさ2」はC型小惑星 1999JU3 からのサンプルリターンを行う探査機であるが、貴重なサンプルといえども小惑星表面上の数点の情報にすぎない。そのため現地における小惑星観測による小惑星のグローバルな特徴の観測、小惑星表面の詳細な観察はサンプルリターンと相補的で重要なサイエンス目的である。遠隔探査による小惑星の地形、地質構造、構成鉱物、表層粒度や物理状態から内部構造を調べることは必須である。また、サンプル採取地点の高解像度な観測データはサンプルの出自を明確にする必要情報である。

一方で、表層の構成粒子のサイズや空隙率、硬さ、化学組成、鉱物組成などについて、小惑星表面で観察することは非常に有意義である。遠隔探査、サンプルとをつなぐスケールでの物質や表層環境の情報を取得し、両者の関係をつなぐシナジー効果が期待できる。

このため、現在は MINERVA-II と MASCOT という2種類の小型着陸探査ロボットを小惑星表面に降ろし、観測を行う予定である。これらについて紹介し、できる科学探査項目を提示する。

MINERVA-II は、「はやぶさ」に搭載された MINERVA の姉妹機であるホッピング探査機であり、大学等のコミュニティとコンソーシウムにより開発する。2台の立体カメラ、1台の望遠カメラを搭載する。温度センサがウニの針状に突き出しており、小惑星の表面に接触して温度を計測する。加速度計により、表面でのバウンド時に表層の硬度を計測する。そのほか、紫外 LED 照射による蛍光発光による有機物の調査も検討している。

MASCOT は、ドイツ DLR を中心に検討を進めている国際協力による小型ローバで、母船上の分離機構を含めて合計 10 以下である。うち観測機器は 3 未満である。ひとつは、12 点式マルチバンドまたは多色 LED 照射による多波長で周辺観察し、地形や地質構造を把握するカメラ WAC である。2 番目は、可視・近赤外の分光マクロカメラ MicrOmega であり、表層の微細な構造や鉱物組成に関する情報を得る。3 番目はレーザー誘起破壊分光装置 LIBS であり、表層の岩石を構成する主要な元素、水・有機物に関係する揮発性の高い元素を調べる。4 番目として、磁力計が候補になっており、太陽風通過時の磁場変動により小惑星内部の平均誘電率や電気伝導率、すなわち空隙率や金属相の存在度を調べる。そのほか、温度センサ、加速度センサ、傾斜計などがあり、小惑星表層の温度、表面硬さ、地形の傾斜などを調査する。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星探査, 表面探査, 顕微撮像, 元素分析

Keywords: Hayabusa2, Asteroid Exploration, surface experiment, microscopy, elemental analysis

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS022-04

会場:国際会議室

時間:5月26日 17:15-17:30

## はやぶさ2搭載衝突装置の科学目的 Scientific Objectives of the Impactor on board Hayabusa 2

高木 靖彦<sup>1\*</sup>, 矢野 創<sup>2</sup>, 岡本 千里<sup>2</sup>, 佐伯 孝尚<sup>2</sup>, 赤星 保浩<sup>3</sup>, はやぶさ2プロジェクトチーム<sup>2</sup>  
Yasuhiko Takagi<sup>1\*</sup>, Hajime Yano<sup>2</sup>, Chisato Okamoto<sup>2</sup>, Takanao Saiki<sup>2</sup>, Yasuhiro Akahoshi<sup>3</sup>, Hayabusa 2 Project Team<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛知東邦大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 九州工業大学  
<sup>1</sup>Aichi Toho University, <sup>2</sup>JAXA, <sup>3</sup>Kyushu Institute of Technology

探査機「はやぶさ」に続く小惑星探査機「はやぶさ2」は、表面物質サンプリング装置、遠隔観測装置に加えて、衝突装置を搭載する。この小型搭載衝突装置では、質量約2kgの金属塊を秒速2km/secで小惑星表面へ衝突させることが可能になる予定である。この衝突で小惑星1999JU3上でどのような現象が起こると予測されるのか、それをどのように観測して、どのような科学的知見を得ようとしているのかをまとめる。

キーワード: 小天体探査, 衝突現象, 始原物質

Keywords: small body exploration, impact phenomena, primitive material

PPS022-05

会場:国際会議室

時間:5月26日 17:30-17:45

## はやぶさ2のサンプル回収模擬実験

### Laboratory experiments simulating for sample recovery in the Hayabusa-2 mission.

池崎 克俊<sup>1\*</sup>, 矢野 創<sup>2</sup>, 岡本 千里<sup>2</sup>, 橋 省吾<sup>3</sup>, 今栄 直也<sup>4</sup>, 土山 明<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 中村 昭子<sup>5</sup>, 富山 隆将<sup>6</sup>  
Katsutoshi Ikezaki<sup>1\*</sup>, Hajime Yano<sup>2</sup>, Chisato Okamoto<sup>2</sup>, Shogo Tachibana<sup>3</sup>, Naoya Imae<sup>4</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>,  
Akiko Nakamura<sup>5</sup>, Takayuki Tomiyama<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>4</sup> 情報・システム研究機構 国立極地研究所, <sup>5</sup> 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>6</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Earth and Space Sci., Osaka Univ., <sup>2</sup>JAXA/ISAS & JSPEC, <sup>3</sup>Earth and Planet. Sci., Univ. of Tokyo., <sup>4</sup>AMRC, NIPR, <sup>5</sup>Grad. Sch. of Sci., Kobe Univ., <sup>6</sup>JAMSTEC

はやぶさ2計画として、C型小惑星「162173 1999JU3」へのサンプルリターンミッションが計画されている。はやぶさ計画と同様の弾丸式サンプラーの搭載が予定されている。サンプルの収量を増加させることを目的として、目標小惑星の表面物質に対応すると考えられる炭素質コンドライトの模擬物質を作成し、弾丸の打ち込み実験を行った。本稿では、ターゲットの違いによるサンプル収量の変化について述べる。

模擬炭素質コンドライト(以下模擬物質と示す)の作成には、ガラスビーズを用いた。コンドライトを構成するコンドリユールとマトリクスに対応するように、それぞれのサイズに近い250-355  $\mu\text{m}$ と20  $\mu\text{m}$ 以下のガラスビーズを用いた。また、炭素質コンドライト隕石の強度を参考に圧裂引っ張り強度が0.数MPa~数MPaになるようにした(Tuchiyama et al., 2009)。2種のガラスビーズの混合物質(混合比は20%あるいは50%)を焼結させ、焼結温度と時間をコントロールすることにより所定の強度をもつ模擬物質を作成した。

実験ははやぶさ2と同様に火薬銃を用いて行った。プロジェクティルはタンタル(10 mm, 4.6 g)を使用し、形状は半球、約200 m/sでターゲットに衝突させた。ターゲットは模擬物質だけでなく、比較のため耐火レンガやガラスビーズも用いた。

ターゲットの違いにより、破片質量分布、破片速度、クレータの直径や深さなどに差異がみられた。これらの結果について述べる。

キーワード: はやぶさ2, サンプリング, 衝突

Keywords: Hayabusa-2, sampling, impact

## 小惑星 6 Hebe、433 Eros、および 25143 Itokawa の宇宙風化度および組成の推定 Estimating the composition and the degree of space weathering of asteroids 6 Hebe, 433 Eros, and 25143 Itokawa

二村 徳宏<sup>1\*</sup>, 安部 正真<sup>1</sup>, 廣井 孝弘<sup>2</sup>, ピーターズ カーリ<sup>2</sup>  
Tokuhiro Nimura<sup>1\*</sup>, Masanao Abe<sup>1</sup>, Takahiro Hiroi<sup>2</sup>, Carle M. Pieters<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, <sup>2</sup> 米ブラウン大  
<sup>1</sup> ISAS/JAXA, <sup>2</sup> Brown University

固体惑星表面の鉱物学的特長を遠隔探査によって解明するために有用な方法の1つが可視・近赤外反射分光である。しかしながら、その解析には以下の2つの問題が存在する。

(1) 小惑星のように大気のない天体表面上では、宇宙風化という現象が存在する。これは太陽風や微小隕石衝突を含む宇宙空間の厳しい環境による変化である。宇宙風化によって、反射スペクトルは赤化、暗化、吸収帯弱化が生じる [Pieters et al., 1993] ため、固体惑星表面の反射分光解析が困難である。

(2) 可視・近赤外反射分光データは多種の鉱物に起因する複数の幅広い吸収帯が接近して複合吸収帯を形成しているため、反射分光データ解析において各鉱物の吸収帯分離抽出が困難である。

本研究では、上記2点の問題解決を行った。

はじめに、宇宙風化作用により生成されるナノ還元鉄 (npFe<sup>0</sup>) 粒子を含んだ蒸着層を持つレゴリス粒子の光散乱特性を、Hapke [2001] に倣いモデル化した。具体的には、吸収係数への効果以外に境界反射率変化も考慮しモデル化することで、問題(1)を解決した。本モデルを用いることで、従来から難題とされてきた、月のレゴリスのような宇宙風化度が大きい反射スペクトルにおいても、宇宙風化層の厚さと宇宙風化層中の npFe<sup>0</sup> の体積濃度を見積もることを可能にした。

次に、珪酸塩の吸収係数について考察した。珪酸塩鉱物の複雑な吸収スペクトルを個別の吸収帯に分離する1つの方法として、修正ガウス関数モデル (MGM) [Sunshine et al., 1990] が一般的に使用されている。本研究では、主要造岩鉱物であるカンラン石、低 Ca 輝石、および高 Ca 輝石の化学組成 (Fe、Mg、Ca 量) と吸収帯パラメータ (吸収帯の中心波長、幅、強度比) の関係を求めた。また、同じく主要造岩鉱物である斜長石の吸収帯の中心波長、幅、強度比も求めた。そして、この関係を MGM 計算に組み込むことにより、問題(2)を解決した。

以上2つのモデルおよび鉱物混合モデルを用いて、大気のない固体天体の可視・近赤外反射スペクトルから、天体表面物質の鉱物組み合わせ、構成鉱物の化学組成、鉱物の粒子サイズ、宇宙風化度を推定できる統一モデルを構築した。

そして、本研究で構築した統一モデルを3つの小惑星 (6 Hebe、433 Eros および 25143 Itokawa) の可視・近赤外反射分光データに応用し、解析で推定されたそれらの表面組成が隕石中に豊富な H コンドライト (6 Hebe) および LL コンドライト (433 Eros、25143 Itokawa) に対応することを示した。その事実は、他の既存の手法によっても明らかにされていたが、本研究では、それら小惑星の表面物質の Mg 値、カンラン石・低 Ca 輝石・高 Ca 輝石・斜長石という4つの鉱物混合比、粒子サイズ、宇宙風化度について、可視・近赤外反射スペクトルを解析することのみで決定した。さらに各小惑星のレゴリスについて、宇宙風化作用によってできた蒸着層の厚さおよびその層内の npFe<sup>0</sup> の体積濃度を個別に決定した。その結果、3つの小惑星の間で蒸着層の厚さと npFe<sup>0</sup> の体積濃度に違いがあるということ新たに発見した。前者は、重力が小さく細粒のレゴリスを長く保持できず、表面が岩石や粗粒のレゴリスからなる天体において、その表面が細粒なレゴリスを保持している天体より長く宇宙風化にさらされていると考えることで説明できる。これは重力の大きな天体において、内部の新鮮な物質が掘り返され表面が刷新されていることを示唆している。後者は天体表面での金属鉄の存在度の違いによって説明できる。この発見は、H コンドライトが LL コンドライトよりも金属鉄に富んでいるという事実と整合的である。また同じ LL コンドライト的組成を持つにもかかわらず、433 Eros は 25143 Itokawa よりも高い npFe<sup>0</sup> の体積濃度を示しており、25143 Itokawa よりもサイズが大きな 433 Eros 上では LL コンドライト鉱物組み合わせ中の金属鉄を珪酸塩から分離する何らかのメカニズムがある可能性を示唆している。例えば、433 Eros に十分な細かさのレゴリスがあって、振動により金属鉄がレゴリス表面に濃集することが考えられる。NEAR 探査機が発見した Pond はそのようなメカニズムによって形成されたかもしれない。

キーワード: スペクトル, 宇宙風化作用, 小惑星, 修正ガウス関数モデル

Keywords: spectroscopy, space weathering, asteroid, modified Gaussian model

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS022-07

会場:国際会議室

時間:5月26日 18:00-18:15

## 太陽系小天体の表面プロセス：小惑星の内部構造と、その探査に向けて Surface processes on small bodies: Implications to the internal structures of asteroids and their explorations

宮本 英昭<sup>1\*</sup>, 西堀俊幸<sup>2</sup>, 真鍋武嗣<sup>3</sup>, 渡邊宏弥<sup>1</sup>, 平田直之<sup>1</sup>, 北野遼<sup>3</sup>, 春山純一<sup>2</sup>

Hideaki Miyamoto<sup>1\*</sup>, Toshiyuki Nishibori<sup>2</sup>, Takeshi Manabe<sup>3</sup>, Hiromi Watanabe<sup>1</sup>, Naoyuki Hirata<sup>1</sup>, Ryo Kitano<sup>3</sup>, Junichi Haruyama<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学総合研究博物館, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 大阪府立大学

<sup>1</sup>University Museum, University of Tokyo, <sup>2</sup>ISAS, <sup>3</sup>Osaka prefecture university

Recent missions reveal that significant varieties exist in the shapes and surface states of small bodies in the solar system. These are partly results of surface processes including cratering, reaccumulations of ejecta, migrations of gravels, and space weathering. Recently, we find an impact crater on the unusually smooth-looking surface of a small saturnian satellite, Atlas, whose enigmatic shape is explained by accumulations of particles from the A-ring of Saturn. This finding as well as geologic and electro-static analyses indicate that the surface of Atlas is covered by fine particles, which electro-statically levitate, migrate, and deposit to erase surface features, including craters. Such process is likely active on other small satellites of Saturn if they are 1) in the region outside the orbit of Titan, and 2) in the region that lies within A-, B-, and C-rings, including the orbits of Atlas and Pan. Also, this process might be important even for near-earth asteroids, especially if large amount of fine particles are supplied on their surfaces.

We consider this process is another example that the surface states of small bodies can be more active than relatively larger bodies, such as the Moon. In this talk, we will review the surface processes on the surface of small bodies and discuss their implications to the internal structures of asteroids. We also present the current status of our development of a Ground Penetrating Radar for future asteroid mission, which is probably the most effective way to explore the near-surface structures of asteroids.

キーワード: 小惑星, はやぶさ 2, 衛星, 表面プロセス

Keywords: asteroid, Hayabusa, satellite, surface processes

# Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS022-08

会場:国際会議室

時間:5月26日 18:15-18:30

## はやぶさカプセル・パラシュートの地球観測衛星による搜索 Search for Hayabusa Re-entry Capsule and Parachute after Landing by the Formosat-2 Remote Sensing Instrument

中村 良介<sup>1\*</sup>, 亀井秋秀<sup>1</sup>, 中村和樹<sup>1</sup>, 松岡 昌志<sup>1</sup>, 山本浩万<sup>1</sup>, 矢野 創<sup>2</sup>

Ryosuke Nakamura<sup>1\*</sup>, Akihide Kamei<sup>1</sup>, Kazuki Nakamura<sup>1</sup>, Masashi Matsuoka<sup>1</sup>, Yamamoto Hirokazu<sup>1</sup>, Hajime Yano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup> AIST, <sup>2</sup> ISAS/JAXA

小惑星探査機はやぶさから放出されたカプセルは、2010年6月13日11時半すぎ(現地時間)にオーストラリアウーメラ砂漠に着地し、ビーコン電波を用いた方探およびヘリコプターからの観測によって、即座に発見された。はやぶさの後継機においても、カプセルはウーメラ砂漠に帰還することが想定されている。カプセルからのビーコンが出ないような緊急事態においては、数十kmにもおよぶ範囲を一度に撮像できる宇宙からの地表観測は、カプセル搜索の効率的な手段となりうる。

そこで我々は、宇宙から地球を観測する衛星によって取得された画像上での、このカプセルとパラシュートの同定を試みた。衛星/センサーとしては、ウーメラ砂漠を毎日観測可能な台湾の衛星 Formosat-2 に搭載された RSI を用い、帰還当日の13日午前と翌14日午前取得した画像の変化抽出解析を行った。パンクロマティック画像の分解能は2.5m/pixelであり、原理的にはパラシュートは分解できているはずだが、明確な差分は抽出できなかった。この結果に基づいて、はやぶさ2のカプセル検出を行うために必要な地球観測センサの性能(空間分解能、輝度分解能)および運用について議論する。

キーワード: はやぶさ, リモートセンシング, 変化検知, 小惑星

Keywords: hayabusa, remote sensing, change detection, asteroid



## 小天体衝突における高速エジェクタの放出速度と角度 Ejection Velocity and Angle of the Fast Ejecta from Impact of Small Bodies

高部 彩奈<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>1\*</sup>, 桂 武邦<sup>1</sup>, 高沢 晋<sup>1</sup>, 瀬藤 真人<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>

Ayana Takabe<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1\*</sup>, Takekuni Katura<sup>1</sup>, Susumu Takasawa<sup>1</sup>, Masato Setoh<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

<sup>1</sup>Kobe University, <sup>2</sup>ISAS/JAXA

固体どうしの衝突によって発生したエジェクタの放出に関して、点源近似が成り立つような衝突点から離れた場所からのエジェクタ放出位置と放出速度や、エジェクタ総質量と放出速度の関係を調べた実験データはいくつかあり、それらをもとにしたスケーリング則も提案されている。しかし、衝突点近傍からの高速エジェクタの放出速度や放出角度と衝突速度や衝突体の物理特性の関係については、よくわかっていない。

われわれは宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃を使用して衝突実験を行った。ターゲットには岩石、気化しやすいナイロンを用いた。プロジェクトイルにはポリカーボネートの先端に鉄または鉄隕石をつけたもの、気化しやすく密度の小さいナイロン球、鉄隕石、岩石質天体を模擬したガラス球などを使用した。高速度ビデオカメラを用いて衝突の瞬間を撮影し、その画像から高速エジェクタの速度とエジェクタの放出角度（ターゲット表面に垂直な方向からみた角度）を求めた。

その結果、初期発生圧力が増すと先端エジェクタ速度も大きくなることがわかった。また、プロジェクトイルが異なると先端エジェクタ速度も異なった。蛇紋岩とかんらん岩の先端エジェクタ速度に大きな差は見られなかった、すなわち、脱水の影響は確認されなかった。理論的に固体エジェクタ速度は最大で粒子速度の2倍であると考えられている。ナイロンをプロジェクトイルに用いた実験では明らかにエジェクタ速度がこの理論限界より大きくなるという結果が得られた。これはナイロンの気化による影響でエジェクタが加速した可能性があると考えられる。放出角度は、衝突初期発生圧力とともに減少する弾丸標的の組み合わせと、あまり変化しない場合とがあった。

キーワード: 小天体, 衝突, エジェクタ, 速度

Keywords: small bodies, impact, ejecta, velocity

PPS022-10

会場:国際会議室

時間:5月27日 08:45-09:00

## 微小重力下での低速度衝突におけるガラスビーズの反発係数測定

The measurements of restitution coefficient for glass beads at low collision velocity under microgravity.

町井 渚<sup>1\*</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>, パトリック ミッシェル<sup>2</sup>  
Nagisa Machii<sup>1\*</sup>, Akiko M. Nakamura<sup>1</sup>, Patrick Michel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> コートダジュール天文台  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kobe Univ., <sup>2</sup> UNS/CNRS/OCA

太陽系の氷小天体にはポーラスな構造をもつものがある。この構造は衝突による破片の再集積によって形成した可能性がある。我々はこれまでガラスビーズ焼結体を用いた衝突実験を行い、ポーラスな小天体の静的強度および内部構造と突破壊強度の関係を調べた [1]。今後、数値シミュレーションでガラスビーズ焼結体の衝突過程を模擬するための基礎データとして、本研究では微小重力下でのガラスビーズの反発係数の測定を行なった。

実験は2010年11月12日にドイツ、ブレーメンにあるZARM Drop Towerで2回行なった。落下塔には高さ110mの落下管があり、管内を10 Pa以下まで真空引きできる。本実験ではサンプルチャンバーを垂直方向に投げ上げる方式を採用し、9.3秒間 $10^{-5}$ から $10^{-6}$  g程度の微小重力下で行なった。サンプルチャンバー内にサンプルホルダーとハイスピードカメラを設置した。サンプルホルダーには直径4.7 mmのソーダライムガラスビーズを32個充填し、微小重力下での粒子の衝突をビームスプリッターを通してハイスピードカメラで撮影した。撮影速度は500 frames/s、シャッター速度は1/5000 sである。

得られた2方向からの画像を解析し、3次元座標データからそれぞれの粒子の衝突速度を求め、反発係数を求めた。

[1] Machii, N. and Nakamura, A.M., 2011. Icarus 211, 885-893.

## 脆性体の破片形状分布とモデル計算

### A numerical model for the shape distribution of fragments in brittle targets

道上 達広<sup>1\*</sup>, 城野 信一<sup>2</sup>

Tatsuhiko Michikami<sup>1\*</sup>, Sin-iti Sirono<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立 福島工業高等専門学校, <sup>2</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>Fukushima National College of Technology, <sup>2</sup>Nagoya University

室内実験において、衝突破壊における破片の形状の分布は、特徴的かつ普遍的な分布になっていることが知られている。それは破片の長軸 a: 中間軸 b: 短軸 c の比が平均で 2: 2:1 になっていることである。この分布は、衝突速度、標的の形状など実験条件に依らず成り立っている (Fujiwara et al., 1977; Capaccioni et al., 1984)。また最近の研究で、この法則は大きさ 200m 以下の高速度回転 (自転速度 1 時間以内) の小惑星の形状、小惑星エロスの岩塊 (一部) の形状でも成り立っており、小惑星イトカワの岩塊でも成り立っていることが示唆されている (Michikami et al., 2010)。しかしながら過去の研究において、なぜこのような普遍的な形状分布になっているか、定性的な解釈もできてない。例えば、Capaccioni et al. (1984) は、立方体をランダムに切り、各破片の幾何学的形状を調べたが、衝突破片に見られるような形状比にはならなかった。本研究では、破壊の統計物理モデルで有名な Grady and Kipp (1980) のモデルのクラック成長の仕方を改良し、数値計算を行うことで、衝突破壊における破片の形状分布を再現した。その結果、形状分布はクラックの成長速度、欠陥の数、標的の形状には依存せず、欠陥の配置に大きく依存することが分かった。

キーワード: 脆性体, 破片形状, 衝突破壊

Keywords: brittle target, shape of fragments, impact

PPS022-12

会場:国際会議室

時間:5月27日 09:15-09:30

## 高空隙率焼結体への衝突による潜り込み深さとその形状 Impact Experiments on High Porosity Sintered Targets: Penetration Depth and Track Morphology

岡本 尚也<sup>1\*</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 池崎 克俊<sup>3</sup>, 土山 明<sup>3</sup>

takaya okamoto<sup>1\*</sup>, Akiko M. Nakamura<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>, Katsutoshi Ikezaki<sup>3</sup>, Akira TSUCHIYAMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 大阪大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Kobe University, <sup>2</sup> ISAS/JAXA, <sup>3</sup> Graduate School of Osaka University

微惑星や彗星などの太陽系始原天体は高い空隙率を持つと考えられている。そのような高空隙率を持つ天体に衝突が起こったとき、密度の異なる小天体や塵が衝突したときの潜り込み過程や破壊・圧密過程は、衝突速度とともに、天体の空隙率、強度、ミクロな構造によると考えられる。

我々は高空隙率を持つターゲットを作成するために、試料にソーダ石灰硼珪酸ガラスを組成とする中空ガラスビーズ(粒径 55  $\mu\text{m}$ )を用いた。これを焼結させておよそ 95%の高空隙率を持つ円柱形のターゲット(密度 $\sim 0.14\text{ g/cm}^3$ )を作成した。最終潜り込み深さと形状のデータを得るために長さの長いもの( $\sim 130\text{mm}$ )から、ターゲットを減速されながら通過して抜け出した弾丸速度のデータを得るための長さの短いもの(e.g.  $\sim 25\text{mm}$ ,  $\sim 45\text{mm}$ )を用意した。このターゲットを用いて、弾丸の減速過程を調べるため、まず神戸大学の小型軽ガス銃を使い低速実験(衝突速度 $\sim 250\text{ m/s}$ )を行って、高速度カメラから画像解析を行い、低速下での抵抗係数を求めた(岡本他、秋期講演会 2010)。そして今回、宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃を使い高速衝突実験(衝突速度 $\sim 2.5\text{ km/s}$ ,  $\sim 4.0\text{ km/s}$ ,  $\sim 7.0\text{ km/s}$ )を行った。弾丸にはサイズの異なるガラス球、チタン球を用いている。

解析には、大阪大学にある CT 装置を用いて弾丸が貫入して作った衝突のトラック形状を調べ、潜り込み深さを測定した。この潜り込み深さと、高速度カメラでとらえたターゲットを抜け出る弾丸の速度の両方の実験結果から弾丸の減速過程を表すモデルを議論する。

キーワード: 空隙率, 焼結, 衝突実験

Keywords: porosity, sinter, impact experiment

PPS022-13

会場:国際会議室

時間:5月27日 09:30-09:45

## イカロス搭載大面積薄膜ダスト検出アレイによる内惑星領域のダスト分布計測 Micrometeoroid Flux inside 1 AU Heliocentric Distance Measured by IKAROS-ALADDIN

矢野 創<sup>1\*</sup>, 平井 隆之<sup>2</sup>, 岡本 千里<sup>1</sup>, 尾川 順子<sup>1</sup>, 田中真<sup>3</sup>, IKAROS-ALADDIN チーム<sup>1</sup>

Hajime Yano<sup>1\*</sup>, Takayuki Hirai<sup>2</sup>, Chisato Okamoto<sup>1</sup>, Naoko Ogawa<sup>1</sup>, Makoto TANAKA<sup>3</sup>, IKAROS-ALADDIN Team<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JAXA 宇宙科学研究所/月惑星探査 P G, <sup>2</sup>総合研究大学院大学, <sup>3</sup>東海大学

<sup>1</sup>JAXA/ISAS & JSPEC, <sup>2</sup>Graduate University for Advanced Studies, <sup>3</sup>Tokai University

IKAROS(Interplanetary Kite-craft Accelerated by the Radiation Of the Sun), a 20-m-across solar sail demonstration spacecraft was launched by H-IIA rocket in May 2010. As the world's first solar sail in deep space, IKAROS carries ALADDIN (Arrayed Large-Area Dust Detectors for INterplanetary space) dust detector made of 0.54 m<sup>2</sup> PVDF sensors which deploy on its 7.5 micron polyimide sail membrane. As the first deep space dust detectors developed and built in Japan, ALADDIN continuously measures dust flux in the vicinity of the Earth to that of Venus within its first 6-month cruising and now in its extended mission period. On its thin sail membrane, a large-area but still light-weight dust detector arrays made of 8 channels of 9-20 micron-thick PVDF were attached in order to count and time hypervelocity impacts by micrometeoroids larger than a few micron size during its interplanetary cruise. The sensors filter electronic, thermal and vibration noises and record time, peak hold value, and relax duration of signals of micrometeoroid impacts. Inside the orbit of the Earth (~1.0 AU) down to the vicinity of Venus (~0.7 AU), ALADDIN has measured abundant dust flux each of which separated by a 24-hour bin, thus enabling to discuss heliocentric dependency of the flux variation around >10<sup>-12</sup> g mass range in the finest detail among any previous spacecraft such as Helios-1/2 and Galileo. The ALADDIN dust flux in 2010 is generally consistent with flux trends of Helios in 1980's and Galileo in 1990's but some fine structures are observed.

キーワード: 宇宙塵, その場計測, ソーラーセイル, 内惑星領域, 衝突フラックス

Keywords: Micrometeoroids, In-situ Measurement, Solar Sail, Inner Region of the Solar System, Impact Flux

## First results from the 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: the Orionids First results from the 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: the Orionids

Csilla Szasz<sup>1\*</sup>, Johan Kero<sup>1</sup>, Takuji Nakamura<sup>1</sup>, David D. Meisel<sup>2</sup>, Toshio Terasawa<sup>3</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>4</sup>, Yasunori Fujiwara<sup>5</sup>, Masayoshi Ueda<sup>5</sup>, Koji Nishimura<sup>1</sup>

Csilla Szasz<sup>1\*</sup>, Johan Kero<sup>1</sup>, Takuji Nakamura<sup>1</sup>, David D. Meisel<sup>2</sup>, Toshio Terasawa<sup>3</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>4</sup>, Yasunori Fujiwara<sup>5</sup>, Masayoshi Ueda<sup>5</sup>, Koji Nishimura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>SUNY Geneseo, Geneseo, NY, USA, <sup>3</sup>University of Tokyo, Chiba, <sup>4</sup>University of Tokyo, Tokyo, <sup>5</sup>Nippon Meteor Society

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>SUNY Geneseo, Geneseo, NY, USA, <sup>3</sup>University of Tokyo, Chiba, <sup>4</sup>University of Tokyo, Tokyo, <sup>5</sup>Nippon Meteor Society

The aim of this presentation is to demonstrate the capabilities of a new automated analysis scheme developed for meteor head echo observations by the interferometric Shigaraki Middle and Upper atmosphere (MU) radar in Japan (34.85 degrees N, 136.10 degrees E). Meteors, or colloquially shooting stars, are caused by particles from space that are heated up and shattered in the atmosphere. Meteor head echoes are radio waves scattered from the intense regions of plasma surrounding and co-moving with meteoroids during atmospheric flight.

Our analysis procedure computes meteoroid range, velocity and deceleration as functions of time with unprecedented accuracy and precision. This is crucial for estimations of meteoroid mass and orbital parameters, as well as investigations into meteoroid-atmosphere interaction processes. We collected an extensive set of data (>500 h) between June 2009 and December 2010. The data set contains both shower and sporadic meteor detections. Sporadic meteors are those that cannot be directly ascribed to a parent body. Sporadics are the most numerous among our observed particles, and the main contributors to the mass influx into the Earth atmosphere.

Here, we present initial results from data taken 2009 October 19-21. More than 600 of about 10 000 head echoes recorded during 33 hours were associated with the 1P/Halley dust of the Orionid meteor shower. The Orionid activity within the MU radar beam reached about 50 per hour during radiant culmination. The rate of sporadic meteors in the MU radar data, coming primarily from the direction of the Earth's apex, peaked at about 700 per hour during the same observations.

Head echoes of shower meteors are quite rare in modern high-power large-aperture (HPLA) radar data, primarily because sporadics outnumber shower meteors in the low-mass regime observable with these radar systems. The small collecting area of an HPLA radar system further limits successful observation of shower meteors. Analysis performed on a limited data set may, therefore, contain no or only a few shower meteors due simply to low statistical probability. In this work, we have estimated the MU radar collection area, calculated the flux of Orionid meteors, and show that the Orionid meteoroid stream activity could be accurately tracked with the MU radar when the radiant is at least 10 degrees above the local horizon.

キーワード: meteor, meteoroid, HPLA radar, head echo

Keywords: meteor, meteoroid, HPLA radar, head echo

## 木星面発光現象と、その小天体研究上の意義 Jovian impact flashes and their implication to small bodies

渡部 潤一<sup>1\*</sup>, 田部一志<sup>2</sup>, 杉田精司<sup>3</sup>, 柳澤正久<sup>4</sup>, 伊藤孝士<sup>1</sup>  
Jun-ichi Watanabe<sup>1\*</sup>, Isshi Tabe<sup>2</sup>, Seiji Sugita<sup>3</sup>, Masahisa Yanagisawa<sup>4</sup>, Takashi Ito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> リブラ (株), <sup>3</sup> 東京大学, <sup>4</sup> 電気通信大学

<sup>1</sup>National Astronomical Observatory, <sup>2</sup>Libra Co., <sup>3</sup>University of Tokyo, <sup>4</sup>The University of Electro-communications

2010年6月と8月に相次いで、アマチュア天文家によって木星面での発光現象が観測された。これらの現象は大きさが数m～数十mという小天体の衝突による流星現象による発光と考えられ、これまでの予想よりも頻発している可能性が高くなってきた。発光現象の頻度と規模を調査すれば、これまで不定性が大きかった巨大惑星領域での小天体について、そのサイズ分布をこれだけ小さなサイズにまで決めることができるという大きな可能性が開けてきた。系統的組織的な観測が実現できれば、巨大惑星を、いわば天然の小天体検出器として活用するユニークな試みとなる。

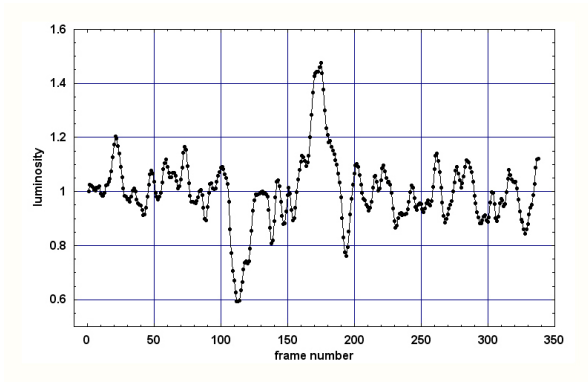
巨大惑星、特に木星への天体衝突は、しばしば起きる現象である。1994年のシューメーカー・レビー第9彗星の衝突はいくつまでもないが、2009年7月には日本を含む多くのアマチュア天文家が、衝突によって生じたと思われる痕跡が発見された(三品利郎、日本天文学会・天文月報2010年8月号)。ハッブル宇宙望遠鏡などでの追跡観測が迅速に行われ、1994年と同じような直径500m～1km程度の小天体であると推定された(A. Sanchez-Lavega et al. 2009, H.B. Hammel et al. 2010)。この衝突は裏側で起きたため、発光は観測されなかったが、2010年6月には、オーストラリアとフィリピンのアマチュア天文家二人が独立に木星面をビデオで撮影中、偶然にも約2秒間の発光を捉えた。解析の結果、この衝突発光を起こした小天体は直径が8-13m程度で、大気に痕跡を残すほど大きくなかったと考えられている(Hueso et al. 2010)。

さらに、そのわずか2ヶ月後の8月21日午前3時22分12秒に、今度は日本でなんと4人のアマチュア天文家(立川正之(熊本市)、青木和夫(東京)、市丸正幸(富山市)、若松孝宜(有田市))が、 $\lambda = 140.4^\circ$ 、 $\delta = +21.1^\circ$ に、独立に約2秒弱の発光を捉えた。このデータは現在、6.2等という発光強度や約2秒という継続時間(図)から見ると、6月の現象の時と、ほぼ同程度か、やや小規模な小天体の衝突であると推定される。

もともと巨大な流星発光現象は、地球では明るさや継続時間が衝突天体の大きさだけでなく、突入速度にも強く依存する。しかし、木星では、その極めて強い重力によって、衝突の方向に依らず、ほぼ同じ速度(秒速60-64km)となるため、サイズを決定する際の不定性がほとんどない。

一方、巨大惑星領域における小天体、特に1km未満のサイズ分布は、直接観測できないこともあって、不定性が大きい。大型地上望遠鏡を用いても、彗星活動をしていない限りは、せいぜい10km程度の天体までしか見えない。一方、衛星表面のクレーターカウントからの推定も可能だが、1km以下のサイズ分布での乖離は大きい。天王星の衛星と木星の衛星からの推定値は0.1kmサイズでは1桁、太陽系外縁天体からの推定に至っては2桁以上も異なる(Zahnle et al. 2003)。木星への衝突確率について、2010年に観測された二例だけを考えると、10mサイズの木星面への衝突は太陽系外縁天体および天王星の衛星のクレーターカウントにより推定されるサイズ分布の間、つまり年間0.5-10個程度となる。ただ、これらが偶然に捉えられた、つまり下限値であることを考えれば、組織的な監視観測によってさらに大きな値を得ることは十分に考えられる。いずれにしろ、これまでまったく決定手段のなかった1km以下の小天体サイズ分布についての情報が得られる有力な手段であることは確かである。逆にクレーター年代学へのフィードバックも考えられる。太陽系内部領域の惑星の表面に残るクレーターは、その大きさ分布がどれも相対的に良く一致しているが、巨大惑星の氷衛星については、まちまちであり、いろいろ複雑なプロセスが関与していることが示唆される。その辺りの理解を進歩させる意味でも、本現象の意義は大きい。

今後は、日本の熟練したアマチュア天文家の協力を得つつ、木星面あるいは土星面を継続的に監視観測するネットワークを構築し、また大型望遠鏡でさらに小規模な現象を捉え、衝突発光の頻度と規模を調査する予定である。



キーワード: 衝突, 発光, 木星, サイズ分布, クレーター  
Keywords: impact, flash, Jupiter, size distribution, Crater



PPS022-16

会場:国際会議室

時間:5月27日 10:15-10:30

## 準惑星ハウメア衝突族の軌道進化: カイパーベルトの歴史への影響 Dynamical Evolution of Haumea Collisional Family: General Properties and Implications for the Trans-neptunian Belt

ソフィアリカフィカ パトリック<sup>1\*</sup>, Jonathan Horner<sup>2</sup>, 中村 昭子<sup>3</sup>, 向井 正<sup>3</sup>  
Ptryk Sofia Lykawka<sup>1\*</sup>, Jonathan Horner<sup>2</sup>, Akiko M. Nakamura<sup>3</sup>, Tadashi Mukai<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 近畿大学 総合社会学部 (天文学分野), <sup>2</sup>University of New South Wales, <sup>3</sup> 神戸大学 理学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Soc. & Nat. Sci., Kinki Univ., <sup>2</sup>University of New South Wales, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Kobe Univ.

Recently, the first collisional family was identified in the trans-neptunian belt, thus revealing the importance of collisions between trans-neptunian objects (TNOs). The family consists of the dwarf planet Haumea and at least nine other ~100 km-sized TNOs. Here, we modeled the long term orbital evolution of an ensemble of family fragments over 4 Gyr. First, we obtained collisional families that reproduced the currently known Haumea's family. In particular, ninety percent of the fragments survived the integrations concentrated in wide regions with the following orbital element ranges:  $a \sim 6-12$  AU,  $e \sim 0.1-0.15$  and  $i \sim 7-10$  deg. Most of the survivors populated the so called classical and detached regions of the trans-neptunian belt, whilst a minor fraction entered the scattered disk reservoir (<1%) or was captured in Neptunian resonances (<10%). In addition, the great majority of fragments displayed negligible long term orbital variations. This implies that the orbital distribution of the intrinsic Haumea's family can constrain the orbital conditions and physics of the collision that created the family billions of years ago. Finally, ~25-40% of the original Haumea family was lost due to planetary ejections or collisions over 4 Gyr.

キーワード: エッジワース・カイパーベルト, 太陽系, ハウメア, 衝突族天体, 海王星, 太陽系外縁天体

Keywords: Edgeworth-Kuiper belt, Solar system, Haumea, Collisional family objects, Neptune, Trans-Neptunian objects (TNOs)