

はやぶさ2の統合サイエンス On activities in the interdisciplinary science of Hayabusa-2

小林 直樹^{1*}; 渡邊 誠一郎²; はやぶさ2 統合サイエンスチーム¹
KOBAYASHI, Naoki^{1*}; WATANABE, Sei-ichiro²; THE INTERDISCIPLINARY SCIENCE TEAM, Hayabusa-2¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

¹ ISAS/JAXA, ² Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

はやぶさ2はC型近地球小惑星である1999JU3からサンプルを持ち帰る小惑星探査ミッションである。その搭載科学装置として、近赤外線分光計(NIRS3)、中間赤外線カメラ(TIR)、可視カメラ(ONC-T)、レーザ高度計(LIDAR)、サンプル(SMP)、衝突装置(SCI)、理学観測用分離カメラ(DCAM-D)、小型ランダ(MASCOT)を搭載する。これらの観測装置を駆使して1999JU3の表層物質と表層状態を特定し、最大3つのサンプリング箇所を選定する。地球に帰還するサンプルの分析により、1999JU3上で生じている物理、化学作用を理解すること、その天体の形成から現在に至る迄の歴史を読み解くことを目指している。従って搭載機器を駆使した表面物質と状態の特徴付け戦略ははやぶさ2の科学成果を成功に導く鍵となっている。そこでサンプルリターンミッションをより効果的なものとするべく、はやぶさ2プロジェクトでは統合サイエンスチームを立ち上げ検討してきた。本報告でははやぶさ2の統合サイエンス活動を紹介する。

はやぶさ2統合サイエンスチームは2012年12月に発足した。発足時に掲げた目的は以下の通りである: はやぶさ2の科学シナリオの全体像の構築、機器横断的なサイエンステーマの識別と各テーマにおける観測装置の役割を明確にすること、ミッションシナリオにおける科学的制約条件と科学的評価を明確化すること、そしてサイエンスの裾野を広げること即ち「小惑星からの惑星科学」を考え尽くすことである。統合サイエンスチームの議論はプロジェクトメンバーにはオープンな場で行われている。これまでに、リターンサンプルの分析戦略、リモセン機器による小惑星表面の不均質の同定、表面温度推定戦略、クレータ年代学、衝突地形、形状モデル作成法、C型小惑星の反射スペクトル、宇宙風化などを真摯に議論してきた。その成果は「表面物質と状態の切り分け戦略」として論理流れ図として結実している。この図には「基本観測量」、「統合観測量」、「同定できる特徴」、その「指標」および「総合的な推定量」の互いの関係が示されている。図中にはこれらの観測量、推定量への各機器の寄与も明示されている。また、統合サイエンスチームでは衝突装置に関する科学運用に関しても熱心に議論されている。衝突装置は微小重力下での壮大な衝突実験を実現し、また、表面をはぎ取ることで内部の物質を露出させる役割を担う。しかしSCIの運用は探査機のシステムリソースを食う大掛かりなものであり、良く練られた運用プランが必須となっている。

作成された論理フロー図ははやぶさ2の科学を成功に導く指針となるものである。それは今後も改訂され、論理的により完備なものとなり込まれる。そのために、論理図を補完する検討や実験などをとりまとめる専門作業グループを設けている。現在は総合試験や機器のキャリブレーション試験など開発フェーズの山場を迎えているため、統合サイエンスの活動をやや落としているが、開発フェーズが終わりに近づくに連れて統合サイエンス活動を活発化させる。はやぶさ2の統合サイエンス活動はその科学ミッションを成功に導く鍵であり、日本における惑星探査を増進させる役割を担うものと考えている。

キーワード: はやぶさ2, 小惑星, 探査, 表層物質, 統合サイエンス, サンプルリターン

Keywords: Hayabusa-2, asteroid, exploration, surface material, interdisciplinary science, sample return

はやぶさ2 ONC-Tの反射分光観測による含水鉱物吸収の検出可能性 Detectability of 0.7 μm absorption band of hydrous minerals using the Hayabusa2 ONC-T Flight Model

亀田 真吾^{1*}; 武井 亮斗¹; 佐藤 允基¹; 奥村 裕¹; 長 勇一郎²; ONC Science Team³
KAMEDA, Shingo^{1*}; AKITO, Takei,¹; SATO, Masaki¹; OKUMURA, Yu¹; CHO, Yuichiro²; ONC, Science team³

¹立教大学, ²東京大学, ³JAXA

¹Rikkyo University, ²The University of Tokyo, ³JAXA

Hayabusa2 has three cameras for optical navigation to the asteroid 1999JU3. ONC-T is one of them and it can be used also for reflectance spectroscopy. The results of the ground-based observation suggested that hydrous materials might remain on the 1999JU3 but on the small part of the surface. To bring them to the Earth, we should perform reflectance spectroscopic observation near the asteroid using ONC-T to locate the point where hydrous mineral is rich.

In this presentation, we will report the result of final calibration test of ONC-T and discuss the detectability of hydrous minerals on 1999JU3.

はやぶさ2レーザ高度計の科学観測のための開発 Development and tests of Hayabusa-2 LIDAR

並木 則行^{1*}; 水野 貴秀²; 千秋 博紀¹; 山田 竜平³; 野田 寛大³; 清水 誠³; 平田 成⁴; 池田 人⁵; 阿部 新助⁶; 松本 晃治³; 押上 祥子³; 吉田 二美³; 平田 直之⁷; 宮本 英昭⁷; 佐々木 晶⁸; 荒木 博志³; 田澤 誠一³; 石原 吉明²; 小林 正規¹; 和田 浩二¹; 出村 裕英⁴; 木村 淳⁹; 早川 雅彦²; 小林 直樹²; 三田 信²; 川原 康介²; 國森 裕生¹⁰
NAMIKI, Noriyuki^{1*}; MIZUNO, Takahide²; SENSU, Hiroki¹; YAMADA, Ryuhei³; NODA, Hiroto³; SHIZUGAMI, Makoto³; HIRATA, Naru⁴; IKEDA, Hitoshi⁵; ABE, Shinsuke⁶; MATSUMOTO, Koji³; OSHIGAMI, Shoko³; YOSHIDA, Fumi³; HIRATA, Naoyuki⁷; MIYAMOTO, Hideaki⁷; SASAKI, Sho⁸; ARAKI, Hiroshi³; TAZAWA, Seiichi³; ISHIHARA, Yoshiaki²; KOBAYASHI, Masanori¹; WADA, Koji¹; DEMURA, Hirohide⁴; KIMURA, Jun⁹; HAYAKAWA, Masahiko²; KOBAYASHI, Naoki²; MITA, Makoto²; KAWAHARA, Kousuke²; KUNIMORI, Hiroo¹⁰

¹ 千葉工業大学, ²JAXA 宇宙科学研究本部, ³ 国立天文台, ⁴ 会津大学, ⁵ 宇宙航空研究開発機構, ⁶ 日本大学, ⁷ 東京大学, ⁸ 大阪大学, ⁹ 東京工業大学, ¹⁰ 通信総合研究所

¹PERC/Chitech, ²ISAS/JAXA, ³NAOJ, ⁴The University of Aizu, ⁵ARD/JAXA, ⁶Nihon University, ⁷The University of Tokyo, ⁸Osaka University, ⁹Tokyo Institute of Technology, ¹⁰NICT

小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載されるレーザ距離計(LIDAR)の観測データを使った科学観測目標について講演する。小惑星探査の科学的意義を一言にまとめるならば、「原始惑星系円盤⇒微惑星⇒小惑星へといたる過程の missing piece を明らかにする」ということになるだろう。リターンサンプルは隕石と異なり産地情報を有しているため、サンプル分析結果をリモートセンシング観測と結びつけることで、サンプルが経験した「過程」を遡ることができるかも知れない。

「はやぶさ2」のリモートセンシング観測データはその場観察で得られる産地情報である。LIDARは本来は光学航法のためのバス機器であるが、サイエンスチームは距離測定から得られるデータを科学利用する。LIDAR観測の科学目標とは、「衝突破壊・合体のプロセスを含めた小天体物理進化の謎解き」であり、具体的には下記の3つを掲げている。

- (1) 1993JU3の分光スペクトル観測(AMICA, NIR3, アルベド)から collisional family を同定する。
- (2) 形状と重力から平均空隙率を計算し, rubble pile 天体の衝突破壊・合体の歴史を推定する。
- (3) リターンサンプルの宇宙線照射年代, 太陽風インプランテーションから軌道進化を制約する。

加えて Itokawa 探査の科学成果を発展させる(リターンサンプルをさらに活用する)ために以下の2点を新たな科学目標に追加した。

(4) Rubble pile 天体を実証する。Itokawa と 1999JU3 の比較から, rubble pile 天体普遍性とバリエーションを議論する。そのために, 接近運用の復路で成るべく多くの重力観測を実施して空隙率の均一/不均一性を測定する。形状中心と重心の相違を 10 m の精度で測定することを目標としている。

(5) 小惑星ダストのその場観察を行う。従来の研究で提唱されているように, もし小惑星周辺に浮遊するダストが存在するならばレーザの微弱な反射光が検知されるはずである。はやぶさサンプルの出自は表層レゴリスであるのか, 浮遊ダストであるのか, を確認する。小惑星周辺に漂う浮遊ダストを発見することができれば, 空間密度分から, 小惑星ダストの移流・攪拌をその場観察し(3)の解釈に反映する。

講演ではこれらの目標達成のために必要な観測機器性能を紹介し, 試験と開発の現状を報告する。

キーワード: はやぶさ, 小惑星, 探査, レーザ, 高度計

Keywords: Hayabusa, asteroid, exploration, LIDAR

はやぶさ2 TIRの観測から表面熱物性を求める戦略 A strategy to estimate thermal properties using Thermal Infrared Imager on board Hayabusa-2.

千秋 博紀^{1*}; 滝田 隼²; 田中 智³; 岡田 達明³
SENSHU, Hiroki^{1*}; TAKITA, Jun²; TANAKA, Satoshi³; OKADA, Tatsuaki³

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 東京大学大学院理学系研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹PERC/Chitech, ²Graduate School of Science, Tokyo University, ³ISAS/JAXA

Thermal InfraRed imager (TIR) on board Hayabusa-2, an upcoming Japanese mission to C-type asteroid 1999JU3, is non-cooled bolometer which image mid-infrared thermal emission from the asteroidal surface. The field-of-view (FOV) of TIR is 16x12 degrees and its effective pixels are 320x240. So the spatial resolution, which depends on distance from the surface, is about 18m from an altitude of 20km (Home position) and less than 1m from an altitude of 1km.

By comparing the temperature distribution obtained by TIR and thermal evolution model, we can get thermophysical properties such as thermal inertia and emissivity. These parameters are diagnostic for the characteristic size of surface grain.

In this presentation we will present our strategy to estimate the thermophysical properties from TIR observation.

キーワード: はやぶさ2, 熱赤外カメラ, 表面温度, 熱物性, 熱慣性率, 放射率

Keywords: hayabusa-2, thermal infrared imager, surface temperature, thermal properties, thermal inertia, emissivity

小惑星の表面地形と重力ポテンシャルの関係 Relationship on Surface Morphology of Small Asteroids and Geopotential

平田 成^{1*}; 松本 晃治²; 木村 淳³
HIRATA, Naru^{1*}; MATSUMOTO, Koji²; KIMURA, Jun³

¹ 会津大学, ² 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ³ 東京工業大学地球生命研究所

¹ARC-Space/CAIST, The University of Aizu, ²RISE Project, The National Astronomical Observatory of Japan, ³The Earth-Life Science Institute (ELSI) of Tokyo Institute of Technology

小惑星イトカワの表面は smooth terrain と rough terrain という対照的な二種類の地質要素に区分できる。smooth terrain は数 cm 径の細粒の物質で覆われた平坦な特徴を持つのに対し、rough terrain は数 10 cm から数 m に及ぶ boulder で覆われた起伏の激しきで特徴づけられる。イトカワ上では smooth terrain は 3 カ所に分布している。このうち、南極域の MUSES-C 地域、北極域の Sagamihara 地域の 2 カ所が最大の広がりを持つ。Sagamihara 地域に隣接する Uchinoura 地域は、前二者よりは小規模な smooth terrain である。

イトカワでは形状モデルと自転モデルが得られているので、均質な内部構造を仮定すれば表面の重力ポテンシャルを求めることができる。このようにして得られた重力ポテンシャルマップと smooth terrain の分布を比較すると、smooth terrain は重力ポテンシャルの低い領域に分布し、その表面はほぼ等ポテンシャルになっている。これは、移動しやすい細粒物質が隕石衝突などに伴う振動によって低ポテンシャルの地域に溜まった結果 smooth terrain が形成された、という説明とよく対応する。

イトカワの場合、全体形状が両極方向に強く扁平しているため（軸比約 1.2）、両極域は全球で最も標高が低い、すなわちポテンシャルの低い地域となる。そこに細粒の物質が溜まった結果、MUSES-C 地域と Sagamihara 地域の二つの smooth terrain になったと解釈できる。Uchinoura 地域はその形状から衝突クレーターと考えられる。クレーター底もまたローカルな低ポテンシャル域であり、そこに細粒の物質が溜まったものであろう。

天体表面の細粒物質の体積が、表面全体を覆うほど十分であれば、このような分布の偏りは観察されないと考えられるが、若く、小さな小惑星ではレゴリス形成が十分進んでいないため、イトカワのように低ポテンシャルの地域にのみ限定された smooth terrain の形成が見られるはずである。

従って、小惑星の形状または軸比、そして自転状態が得られれば、重力ポテンシャル分布を推定することで、小惑星上での smooth terrain の分布を予測することができる。

小惑星探査機はやぶさ 2 の対象天体である 1999 JU3 は、ライトカーブ観測によって軸比が約 1.2、自転周期は 7.63 h と見積もられている。引力ポテンシャルと遠心力ポテンシャルの関係から、極（短軸上）と赤道（長軸上）での重力ポテンシャル差を求めると、1999 JU3 表面ではやや引力ポテンシャルが勝っているものの、ほぼ両者が釣り合った状態にあることがわかった。従って、この小惑星表面で smooth terrain が形成されている場合、その分布はやや極域に偏っているか、あるいはクレーターなどのローカルな低地にあることが予測される。

キーワード: 小惑星, ジオポテンシャル, smooth terrain, イトカワ, 1999JU3
Keywords: Asteroid, geopotential, smooth terrain, Itokawa, 1999JU3

イトカワの多バンド画像の主成分分析から示唆されるS型小惑星のスペクトル進化 Spectral evolution of s-type asteroids suggested by principal component analysis of multi-band images of Itokawa

古賀 すみれ^{1*}; 杉田 精司¹; 鎌田 俊一²; 石黒 正晃³; 廣井 孝弘⁴; 佐々木 晶⁵

KOGA, Sumire^{1*}; SUGITA, Seiji¹; KAMATA, Shunichi²; ISHIGURO, Masateru³; HIROI, Takahiro⁴; SASAKI, Sho⁵

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 北海道大学 理学研究院, ³ ソウル大学 物理天文学科, ⁴ ブラウン大学惑星地質,
⁵ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, ²Dept. of Earth and Planetary Sci., UC Santa Cruz, ³Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, ⁴Department of Geological Science, Brown University, ⁵Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

背景・目的

イトカワ表面では組成の不均一性が小さいことや、宇宙風化の程度の異なる地域があることなどが知られているが [1,2]、宇宙風化以外にスペクトルを変化させる要素の有無は十分に検証されていない。我々は AMICA (Asteroid Multi-band Imaging CAmera) のイトカワ多バンド画像を用いた主成分分析 (PCA) で、主成分スペクトルとその空間分布を調べている。これまでの解析で、イトカワ、メインベルト小惑星、レーザー照射した隕石のスペクトルの PCA を使った比較から、微小隕石衝突による宇宙風化 [3] により小惑星のスペクトルがどう進化するかが示唆されていた [4]。しかし電磁ノイズの影響で、他の要素については解析できていなかった。本研究では電磁ノイズを除去し、宇宙風化以外に起因するスペクトル変化のトレンドを吟味することを目的として解析する。

方法

AMICA の可視 6 バンド画像 (中心波長 381,429,553,700,861,960nm) を使用した。画像に含まれている周期的な電磁ノイズを正弦波の重ね合わせを引いて除去した。[5] に従い画像校正と反射率への変換、平行移動による位置合わせを行った。

得られた画像を 553nm 画像で規格化し、PCA を行った。特徴的な黒い岩 (Black Boulder) の入った画像も用いた。Black Boulder の成因として [6] で衝撃暗化が指摘されている。また、イトカワのスペクトルを ECAS [7] の 540 個の小惑星スペクトルデータと合わせた PCA でイトカワとメインベルト小惑星のスペクトル分布とを比較した。

結果

電磁ノイズ除去処理により、除去前に比演算画像に顕著に見られた縞模様を除去できた。

イトカワのデータだけの PCA では、PC1 は、430-700nm で特に急な立ち上がりをもつ全体的に右肩上がりのスペクトルとなった。PC1 スコア空間分布は、大きなボルダーの上で値が低いなど先行研究 [8] で得られている宇宙風化度空間分布と調和的であった。

PC2 は 553nm 以外の波長で正の値を持ち、短・長波長の両側に上がったスペクトルとなった。550nm 付近でピーク形を持つ PC2 はイトカワ主要構成物質の無水ケイ酸塩のスペクトルと異なり、物質科学的な解釈は難しい。ボルダーの多い地域では PC1 は大きい、PC2 は小さい値をとるが、PC 1 スコアの極小になるボルダーを取り囲むように PC2 スコアの極大が分布するという特徴が見られた。また、PC1、2 の寄与率はそれぞれ 60-75%、20-30% であった。

一方、Black Boulder のスペクトルは ECAS の PC 空間において他の部分の作るクラスターと離れた位置に分布した。

議論と展望

イトカワだけのスペクトルの PC1、2 の寄与率はイトカワの表面スペクトルの不均一性は 2つのプロセスによって支配されていることを示唆する。また、PC1、2 スコアの分布は、PC2 を決めるプロセスが、宇宙風化の中間的に進行したところで過渡的に起こることを示しているかも知れない。まだイトカワ表面の一部しか観察できていないため今後は全球解析を進めていく。学会の講演では他の地域に見られる傾向を報告する予定である。

一方、Black Boulder が作るスペクトルのトレンドが宇宙風化の影響が卓越する他の地域と異なる事実は、Black Boulder の起源が宇宙風化とは別のプロセス (衝撃暗化が一つの可能性) であることを示唆する。

今回の解析でイトカワ全体で起きている典型的宇宙風化以外のトレンドも捉えることができた。微小隕石による宇宙風化だけでなくより大きな衝突による進化プロセスを合わせて考慮することで、小惑星の進化過程を制約しスペクトルにより分類される小惑星クラス同士の関係性を導けるかも知れない。

参考文献

[1] Abe, M et al. (2006) Sci. 312, 1334. [2] Hiroi, T. et al. (2006) Nature 443, 56. [3] Sasaki, S. et al. (2001) Nature 410,

U06-06

会場:503

時間:4月28日 10:15-10:30

555-557. [4] Koga, S. et al. (2014) 45th LPSC, Abstract #1721. [5] Ishiguro, M. et al., (2010) Icarus, 207, 714. [6] Hirata, N. and Ishiguro, M., (2011) 42nd LPSC, Abstract #1821. [7] Tedesco, E.F. et al. (1982) Astron.J. 87, 1585. [8] Ishiguro, M. et al. (2007) MAPS 42, 1791.

はやぶさ2の衝突装置 Small carry-on impactor of Hayabusa2

佐伯 孝尚^{1*}; 今村 裕志¹; 澤田 弘崇¹; 荒川 政彦²; 高木 靖彦³; 門野 敏彦⁴; 和田 浩二⁵; 早川 雅彦¹; 白井 慶¹; 岡本 千里¹; 小川 和律⁶; 飯島 祐一¹

SAIKI, Takanao^{1*}; IMAMURA, Hiroshi¹; SAWADA, Hiroataka¹; ARAKAWA, Masahiko²; TAKAGI, Yasuhiko³; KADONO, Toshihiko⁴; WADA, Koji⁵; HAYAKAWA, Masahiko¹; SHIRAI, Kei¹; OKAMOTO, Chisato¹; OGAWA, Kazunori⁶; IIJIMA, Yuichi¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 神戸大学, ³ 愛知東邦大学, ⁴ 産業医科大学, ⁵ 千葉工業大学, ⁶ 東京大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Kobe University, ³Aichi Toho University, ⁴University of Occupational and Environmental Health, ⁵Chiba Institute of Technology, ⁶University of Tokyo

Small Carry-on Impactor of Hayabusa2

A Japanese spacecraft, Hayabusa2, the successor of Hayabusa, which came back from the Asteroid Itokawa with sample materials after its 7-year-interplanetary journeys, is a current mission of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) and scheduled to be launched in 2014. Hayabusa2 is a similar sample return mission to Hayabusa, however the type of the target asteroid is different from that of Hayabusa. Asteroid Itokawa, explored by Hayabusa is a rock-rich S-type one. Hayabusa2 will go to a C-type asteroid. Both C-type and S-type asteroids consist of rocks, but C-type asteroids are considered to have organic and water materials. Hayabusa2 has two objectives to discover: organic matters and water in the solar system and relationship between life and ocean water. C-type asteroids are the most common variety and many of them are in the outer part of the asteroid belt beyond 2.7 AU. An asteroid, called 1999 JU3, is chosen as the target of Hayabusa2 mission because it is considerably easy to reach. It has a similar orbit as that of Itokawa and it is in the orbit that occasionally comes close to the earth orbit.

The design of Hayabusa2 basically follows Hayabusa. Its configuration, size and weight are almost same as Hayabusa and the touch-down operation will be performed in much the same way. However, it is planned to be equipped with some new components. Small Carry-on Impactor (SCI) is one of the new challenges. The observations by Hayabusa discovered that Itokawa was rubble-pile body with the macro-porosity. No direct observational data as for their internal structures and sub-surface materials were available, however. One of the most important scientific objectives of Hayabusa2 is to investigate chemical and physical properties of the internal materials and structures in order to understand the history of formation of small bodies such as small, un-differentiated asteroids. In order to achieve this objective, the SCI is required to remove the surface regolith and create an artificial crater on the surface of the asteroid. Different from other impact missions, Hayabusa2 can make a detailed observation of the resultant crater after the impact. Observing the size of the crater is very important to investigate the physical properties of the asteroid. Additionally, Hayabusa2 will try to touchdown near the crater to get the fresh material of the asteroid.

It is very difficult to create a meaningful crater on the asteroid. High kinetic energy (i.e. about 2km/s impact speed and 2kg impact mass) is required to make a crater, but the high speed is difficult to realize. The famous impact mission, Deep Impact was the direct impact mission, which used the interplanetary velocity for the impact speed. Consequently, the impact energy became very high. On the other hand, SCI of Hayabusa2 is a carry-on type impactor and it should accelerate itself after the separation from the mother spacecraft. Therefore, how to accelerate the impact body is a big challenge of SCI. The traditional acceleration devices such as rocket motors and thrusters are difficult to hit the asteroid without a guidance system because the acceleration distance is large. To overcome this difficulty, the powerful explosive is use in SCI. The special type of shaped charge makes it possible to accelerate the impact head in a very short amount of time (less than 1 millisecond) and it becomes possible to crash into the asteroid.

The development of SCI is now almost finished. A lot of tests were conducted during the development period. The overview of the small carry-on impactor system and the results of the development tests will be presented in the conference.

キーワード: はやぶさ2, 衝突装置, 人工クレータ

Keywords: Hayabusa2, Impactor, Artificial Crater

はやぶさ2 小型搭載型衝突装置による科学
Small Carry-on Impactor Elucidates the Nature of Craters and the Evolution of our solar system

和田 浩二^{1*}; SCI チーム²; DCAM3 チーム²
WADA, Koji^{1*}; SCI, Team²; DCAM3, Team²

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² はやぶさ2プロジェクト
¹PERC/Chitech, ²Hayabusa-2 Project

Hayabusa-2, the Japanese next asteroid exploration mission, equips Small Carry-on Impactor (SCI) to launch a decimeter scale projectile on an asteroid surface. This is a novel apparatus to excavate the asteroid surface, and hopefully it will enable us to observe a fresh surface without space weathering and thermal alteration. Furthermore, we will be able to recover the asteroid sample excavated from several 10 cm depth at the deposit of the impact ejecta. The SCI impact on the asteroid is very good chance to examine the projectile scale on the crater scaling law in addition to the study on the gravity effect on the crater formation process. In this presentation, I will introduce the scientific goals of Hayabusa-2 mission using SCI and the scientific problems to be solved in the near future to maximize the scientific outputs of the SCI impact.

キーワード: はやぶさ2, 小型搭載型衝突装置, 衝突, 小惑星
Keywords: Hayabusa-2, SCI, impact, asteroid

はやぶさ2衝突装置(SCI)爆薬部飛翔性能確認試験 The final impact tests of Small Carry-on Impactor(SCI) equipped on HAYABUSA-2

早川 雅彦^{1*}; 佐伯 孝尚¹; 今村 裕志²; 白井 慶²; 和田 浩二³; 荒川 政彦⁴; 岡本 千里²; 津田 雄一¹; 高木 靖彦⁵; 門野 敏彦⁶; 中澤 暁²; 飯島 祐一¹; 矢野 創²; 上斗米 秀夫⁷; 松崎 伸一⁷

HAYAKAWA, Masahiko^{1*}; SAIKI, Takanao¹; IMAMURA, Hiroshi²; SHIRAI, Kei²; WADA, Koji³; ARAKAWA, Masahiko⁴; OKAMOTO, Chisato²; TSUDA, Yuichi¹; TAKAGI, Yasuhiko⁵; KADONO, Toshihiko⁶; NAKAZAWA, Satoru²; IJIMA, Yuichi¹; YANO, Hajime²; KAMITOMAI, Hideo⁷; MATSUZAKI, Shinichi⁷

¹ 宇宙航空開発機構宇宙科学研究所, ² 宇宙航空開発機構月惑星探査プログラムグループ, ³ 千葉工業大学宇宙探査研究センター, ⁴ 神戸大学大学院理学研究科, ⁵ 愛知東邦大学, ⁶ 産業医科大学学医学部, ⁷ 日本工機(株)

¹ ISAS/JAXA, ² JSPEC/JAXA, ³ Planetary Exploration Research Center/Chiba Institute of Technology, ⁴ Graduate School of Science, Kobe University, ⁵ Aichi Toho University, ⁶ University of Occupational and Environmental Health, ⁷ NIPPONN KOHKI Co. Ltd

「はやぶさ2」は現在、フライトモデル総合試験の真っ最中である。これに先立ち各サブシステムは個々に単体を製作完了し、単体総合試験を行って正常動作することを確認して総合試験に合流することになる。はやぶさ2号機から採用されたSCI (Small Carry-on Impactor) は新規サブシステムで、「はやぶさ2」本体から切り離された後、爆薬に点火し銅の弾丸を小惑星1999JU3表面に打ち込むためのものである。

本講演では2013年10月にSCIの爆薬部のFM相当品の最終性能確認試験が行われたので報告する。SCIによって小惑星に打ちこまれる弾丸の重さは約2kg、衝突速度は約2km/secというスペックである。報告する試験ではフライトモデルと同ロットで製作されたSCI爆薬部のフライトモデル相当品に衝撃振動、温度サイクルなどの環境負荷を行い、常温、高温、低温状態で射出試験に供した。相当品がフライトモデルで受けるであろう環境を負荷された後も要求スペックを満たしていることが確認された。

また、このような大規模な衝突(実験)はそうそう行なえないので、衝突現象の解明という立場からも、実験室と天体表面を繋ぐスケールの実験としても位置付けることができ、SCIサイエンスチームとして着弾点でクレーターのできる様子を高速度カメラ、赤外線カメラ、加速度計、地震計などを用いて撮影・計測を行った。その試験(実験)の概要を報告する。

キーワード: はやぶさ2, 衝突装置, 衝突実験, 飛翔実験, クレーター

Keywords: HAYABUSA-2, Small Carry-on Impactor, impact experiment, crater, explosion



はやぶさ2 DCAM3-Dの光学性能検証試験 Optical performance verification of DCAM3-D/Hayabusa 2

石橋 高^{1*}; 荒川 政彦²; 飯島 祐一³; 小川 和律⁴; 白井 慶³; 和田 浩二¹; 本田 理恵⁵; 澤田 弘崇³; 坂谷 尚哉⁶; 門野 敏彦⁷; 小林 正規¹; 中澤 暁³; 早川 基³; 池田 優二⁸
ISHIBASHI, Ko^{1*}; ARAKAWA, Masahiko²; IJIMA, Yuichi³; OGAWA, Kazunori⁴; SHIRAI, Kei³; WADA, Koji¹; HONDA, Rie⁵; SAWADA, Hirota³; SAKATANI, Naoya⁶; KADONO, Toshihiko⁷; KOBAYASHI, Masanori¹; NAKAZAWA, Satoru³; HAYAKAWA, Hajime³; IKEDA, Yuji⁸

¹ 千葉工業大学, ² 神戸大学, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 東京大学, ⁵ 高知大学, ⁶ 総合研究大学院大学, ⁷ 産業医科大学, ⁸ フォトコーディング

¹Chiba Institute of Technology, ²Kobe University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴University of Tokyo, ⁵Kochi University, ⁶The Graduate University for Advanced Studies, ⁷University of Occupational and Environmental Health, ⁸Photocoding

はやぶさ2では、探査対象天体である小惑星 1999JU3 の起源と進化を探るため、小惑星上への SCI (衝突体) の衝突が行われる。重量約 2kg の銅の弾丸を秒速約 2km/s で小惑星表面に衝突させる。この衝突により小惑星上に人工クレーターを形成し、その内部または周囲からの試料採取を行う。また、形成されたクレーター内部の観測から小惑星内部の構造に関する知見が得られると期待されている。さらに、この SCI の衝突は微小天体上での衝突現象を明らかにするという、小惑星上での衝突実験という側面も持ち合わせている。

現在、はやぶさ2に搭載される小型分離カメラ「DCAM3」の開発が進められている。DCAM3は、はやぶさ2本体から分離され、小惑星への SCI の衝突現象を可視光で観測するカメラである。DCAM3にはアナログ系 (DCAM3-A)、デジタル系 (DCAM3-D) の2つのカメラが搭載される。DCAM3-Dは科学観測に利用され、その目的は、(1) SCI (衝突体) の発射および小惑星への衝突の確認、(2) SCI 衝突により生成されるイジェクタの観測である。(1)では、SCI の発射位置や小惑星上の着弾点の位置の観測から、衝突条件の明確化を行う。(2)では、形成されるイジェクタカーテンの形状や移動速度、岩片の放出速度などから、標的状態の明確化、イジェクタのスケーリング則の検証、1999JU3 の表層構造の推定などを行う。

これらの観測目的を達成するためには、DCAM3-D 光学系は非常に厳しい要求仕様を満たさなければならない。SCI と小惑星の両方を捉えるための大きな視野角 (74°)、画像全領域での高い結像・集光性能、暗い SCI やイジェクタを捉えるための明るい光学系 (F>1.7)、耐放射線性、限られたリソース (重量 30g 以下、光軸長 40mm 以下) といった条件に加え、これらをアクティブな温度制御無しで達成することが求められる。

本発表では、DCAM3-D の FM 光学系 (レンズ+ CMOS センサ) の光学性能検証試験の実施状況およびその結果について報告する。光学性能検証試験は、センサの電気試験、コリメータ試験、積分球試験から成る。センサの電気試験では、光学検証試験のベースとなる CMOS センサの性能の評価を行った。当初センサはカタログ値通りの性能が出ていなかったが、調査と改善を経てカタログ値通りの性能を達成することができた。コリメータ試験では、まずシム調整により適切なレンズ-センサ基板距離およびレンズ-センサ角度の最適化を行った。次いで真空下 (<1torr) において温度・波長域・画角をパラメータとして振り、コリメータに設置したピンホール像の撮像を行い、結像・集光性能 (ensquared energy)、空間分解能、歪曲などの評価を行った。シム調整に関しては、より良い結像・集光性能を得るために三回に渡る最適化を行った。積分球試験では感度、周辺減光、迷光などの評価を行った。これら一連の光学性能検証試験の結果は良好であり、DCAM3-D 光学系は非常に厳しい要求仕様を概ね満たしていることが確認された。

キーワード: 小惑星, 惑星探査, はやぶさ2, 観測機器

Keywords: asteroid, planetary exploration, Hayabusa-2, scientific payload

ラブルパイル天体の内部構造がクレーター形成過程に及ぼす影響 The effect of substrate structure of rubble-pile bodies on cratering process

巽 瑛理^{1*}; 杉田 精司¹
TATSUMI, Eri^{1*}; SUGITA, Seiji¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

背景と研究の目的: Hayabusa によって探査が行われた小惑星イトカワの表層には、他の天体には見られない地形が多く観測される。その象徴的な地形の一つに、ボールダーの豊富な表層でのほぼ円形の窪地が挙げられる (Hirata et al. 2009)。本稿では以下、この窪地を QCD (Quasi-Circular Depression) と呼ぶ。QCD は衝突で形成した可能性が高いが、QCD を衝突クレーターであるとしてイトカワの表面年代を推定すると、75Myr-1Gyr と非常に大きな不確実性が出てしまう (Michel et al., 2009)。この大きな不確実性は、主にラブルパイル天体表面でのクレーター則の不確実性による。小天体でのクレーター形成は、大天体で起こっている衝突エネルギーに比べると非常に小さな衝突エネルギーで起こっているはずである (Benz and Asphaug, 1999)。そのような衝突エネルギーでは、従来のクレーター形成過程で議論されてきた材料強度スケールと重力スケールの中間的なプロセスが卓越すると考えられる。つまり、ラブルパイル天体は重力的に相互結合して形作られているので、全体としては物質強度を持たないが、個々の岩塊は強度を持つため、表層ボールダーの破壊による衝突エネルギーの散逸を無視できないのである (Armoring 効果)。

また、クレーター形成過程において重要なのが、質量損失である。脱出速度の小さい小天体では高速イジェクタの質量は質量損失そのものであり、小惑星の消滅のタイムスケールに直接的に関係する。

イトカワはボールダーが豊富な表層を持ち、密度も低いことからラブルパイル天体とされている (Abe et al., 2006; Saito et al., 2006)。しかし、その内部構造の直接的な観測はなく、表層の下の基層構造は不明である。先行研究からは、粉体層でのクレーター形成が容器の影響を受けることや、ターゲットの背面の物質の有無によってターゲットの破壊の程度が変わることが分かっている (荒川ほか, 2012)。このことから、基層がボールダーかレゴリス層かによって、表面ボールダーの破壊やクレーター形成過程が大きく変化すると推論できる。

本研究では、同じラブルパイル天体であっても内部が材料強度を持ったボールダーか、材料強度を持たないレゴリスのような物質かがクレーター形成に大きく影響する可能性に着目した。このような内部の材料強度の有無が表面のクレーター形成にどれほどの影響を与えるかを実験的に検証した。また、小天体のタイムスケールを決める上で重要となる、クレーターの大きさ、エジェクタ質量に着目し、計測を行った。

衝突実験: 実験では、ガラスビーズを模擬レゴリスとし、ガラスビーズ焼結体を 8~15mm 程度に破碎することで模擬ボールダーを作成した。ターゲットの表層は模擬ボールダーで作り、基層は模擬レゴリスのケースと模擬ボールダーのケースの両方を用意した。インパクターはポリカ弾丸 (ϕ 10mm) を 160~180m/s で衝突させ、高速度カメラでクレーター形成過程を観察した。

実験結果: 予備的な実験では、基層がボールダー層であるときには、イジェクタ質量はレゴリス層であるときの 1/5 以下であり、最終的なクレーター直径も 2 割程度小さくなることが観察された。また、基層がボールダーであるとき、表層のボールダーの破壊の程度が高くなることが確認された。この 2 つの観察結果から、基層がボールダーであるときには、衝突エネルギーがボールダーの破壊により多く使われ、クレーター形成に使われるエネルギーが減少したと考えられる。この理由としては、ボールダーの力学的インピーダンスがレゴリスの 10 倍程度と大きいいため、基層がボールダーの場合は強い反射波が表面に戻り、表層のボールダーが効率的に破壊されたという可能性が挙げられる。一方、基層がレゴリス層の場合には、インパクターとボールダーの衝突で発生した応力波はボールダーからインピーダンスの小さいレゴリス層へと効率的に透過し、強度を持たないレゴリス層の運動エネルギーに変換される。結果として、レゴリス層の運動により、表層でのボールダーの破壊はほとんど起こらず、イジェクタの質量が大きくなったと説明できる。

小惑星進化への影響: 上記のように、内部がボールダーのように材料強度を持つ場合にはクレーター直径がレゴリス層に形成される直径に比べて 2 割程度変化するため、イトカワのようなラブルパイル天体の表面年代は単純には決定できない。しかし、本研究で得られたクレーター直径が強度スケールよりも重力スケールに近いという観測事実から、表面年代について先行研究で示された範囲を低年代側 ($\sim 10^8$ 年) ヘシフトさせることが予想される。また、小天体内部もボールダーである場合には、衝突に伴う質量損失が大幅に減る可能性があることが分かった。このことから、小天体の内部構造の違いによって小天体の消滅時間が 5 倍程度変わりうることを示唆された。

キーワード: ラブルパイル天体, クレーター形成, 質量損失, 破壊
Keywords: rubble-pile bodies, impact cratering, mass loss, fragmentation

宇宙空間のコンピュータビジョン: はやぶさ2のための光学航法技術の開発 Computer Vision in Space: Optical Navigation Technology Development for Hayabusa-2

太田 直哉^{1*}
OHTA, Naoya^{1*}

¹ 群馬大学
¹ Gunma University

コンピュータビジョン(以下CVと表記)はカメラで得られた画像を処理し、そこに撮影されている物体の情報を得る技術である。我々ははやぶさ2形状モデル開発グループはこの技術をはやぶさ2の光学ナビゲーションのために利用し、小惑星の形状を復元する技術を開発している。本稿ではその状況について報告する。一方、CV技術の宇宙環境へ適用は、単なる既存の技術の応用に留まらず、この分野を新たな展開へ導く要素も含んでいる。本稿ではこれについても言及する。

小惑星探査機はやぶさ2のミッションにおいて、小惑星へタッチダウンする位置の決定などのために、小惑星の形状モデルを作成する必要がある。しかし小惑星が遠方のため、このモデルは地上からの観測では作成できず、探査機が小惑星に近づいた時点での計測に依らなければならない。またレーザーなど能動的な計測方法は使用エネルギーの点から困難で、カメラによる画像を用いた手法が主になる。我々はこの技術を確立することを目的としている。

画像から物体形状を計算する技術は、CV分野で精力的に研究されている。したがって我々の目的のためには、惑星科学の研究者とCVをはじめとする画像技術の研究者との共同作業が望ましい。グループの運営は惑星科学の研究者である東京大学の杉田精司教授、会津大学の平田成准教授などを中心に行われているが、研究者としてはCV分野から早稲田大学の石川博教授と筆者、コンピュータグラフィクス(以下CG)分野からは東京大学の高橋成雄准教授が参加して、分野融合的に研究を行っている。

現在我々はCV分野で開発されたstructure from motionの技術をそのまま小惑星の形状復元に適用し、有効性を検証している。これは対象を多方向から撮影した画像を用いて形状を計算する技術である。その結果、はやぶさ2のナビゲーションに必要な最低限の形状が得られることは確認されている。しかしより柔軟なナビゲーションを可能にする精度を得ようとすれば、復元技術を更に高度化しなければならない。そのため、上記に加えphotometric stereoの利用を検討している。

photometric stereoは物体の反射特性を利用した形状復元法である。しかしこの技術の利用に当たっては、CV技術をそのまま本目的に利用できない。その理由は探査機が小惑星の形状を復元する状況と、この技術が本来想定している状況とが異なるからである。本来のphotometric stereoは、対象物体を同一視点から照明方向を変えて撮影することを想定している。しかし探査機を小惑星の自転に同期して同じ相対位置に制御し続けることは、燃料の制約上困難である。また物体の反射モデルとしてCV分野ではLambert則やPhongのモデルが用いられるが、小惑星の反射特性はHapke則やMinnaert則などによって記述される。このことから、我々のグループではphotometric stereoを基礎にしながらも、宇宙探査のための小惑星形状復元のための新たな技術を開発し、はやぶさ2のナビゲーションに役立てることを考えている。

CVの発祥を考えると、人間あるいは生物の視覚機能を人工的に実現することが動機となっている。そのため開発された技術も用途を限定せず、使用環境も地球上の一般的な空間を仮定している場合が多い。このことから上記のように、それが宇宙探査のための計測技術としてはそのまま利用できない場合が起こる。しかし、逆に宇宙探査という明確な目的をもってCV技術を見た場合、この技術にまた違った展開が期待できるのではないかと思われる。

宇宙空間での使用を想定した場合、以下のような特殊性が見出せる。まず照明環境は太陽からの平行光のみを想定すれば良い場合も多く、この単純性を最大限に利用した処理が開発できる。また前述のように、地上の一般物体を想定したものではない特別な反射モデルが利用される。また探査機の中で処理を行う場合は実行できる処理量は限られる。そのため処理の目的を明確にし、それを達成する必要最小限の処理を開発するという評価基準が必要になる。また画像を地上に転送して処理する場合には、今度は画像の枚数が制限される。その一方必要とする処理量に制限は少なく、更に長時間の処理も許容される場合も多い。このような場合には対象のCGモデルから画像を作成し、それが観測画像に一致するようにモデルを更新するCG-CV loopのような手法も現実味を帯びるのではないかと思われる。その他形状だけではなく、惑星探査のための計測として必要な情報を得ること、処理結果に関して誤差の指標(error bar)をつけること、など宇宙探査に必要な情報を積極的に提供する技術の開発も、CV分野の一つの重要な研究方向になり得ると考えている。

キーワード: 画像計測, 形状復元, 光学ナビゲーション, はやぶさ2

Keywords: image measurement, shape reconstruction, optical navigation, Hayabusa-2

太陽系有機物の分析化学は惑星科学に何をもたらすことができるか Analytical chemistry of organic compounds in the Solar System: An attempt to link with planetary science

藪田 ひかる^{1*}
YABUTA, Hikaru^{1*}

¹ 大阪大学理学研究科

¹Osaka University, Department of Earth and Space Science

Analytical chemistry of organic compounds in the Solar System small bodies is a microscopic approach for understanding of the origin and evolution of building blocks of the Solar System and life, which has a complementary relationship with macroscopic approaches such as observational and theoretical astronomy. This approach would provide a significance of considering organic compounds in the planetary formation theory, which has been constructed only by silicate and ice dusts. Indeed, significant roles of organic compounds in the early Solar System are explained by (1) high abundances of C, H, O, N in the Solar System, (2) major components of dusts in interstellar clouds, (3) high reactivity to heat, light, shock, water, and minerals (chemical indicator recording the processes in the Solar System), (4) possible contribution to accretion of dusts, due to their stickiness (Kouchi et al. 2002), and (5) possible contribution to redox imbalance in solar nebula (that determined the chemical compositions of chondrules) (Yurimoto and Kuramoto, 1998). Despite these significant roles, however, organic cosmochemistry was not a very popular field in planetary science until several years ago. One of the reasons may be because of difficulty in visualization of organic compounds, i.e., drawing of a big picture. In this point, I attempt to show a simple example. When starch-syrup is heated, how is it changed. One would tell that the color is changed from colorless to brown, the originally sticky syrup becomes less sticky candy, and water-soluble syrup becomes an insoluble solid. These descriptions are based on visibility and are easy to understand. On the other hand, if these phenomena are translated to organic analytical chemistry, the description becomes quite different from the former; hydroxyl groups of glucose changes to carbonyl groups via dehydration as well as aromaticity increases with heating. However, it should be noted that two ways of descriptions explain exactly the same phenomenon. That demonstrates that physical properties (color, stickiness, and solubility) are determined by molecular chemical structures. Likewise, analytical chemistry of organic compounds in the Solar System has a potential to reveal the molecular science that determines physics of macroscopic planetary formation, such as the color of asteroids (albedo). This will become possible by improvements of the in-situ organic analyses such as spectromicroscopy (e.g., STXM), electron microscopy (TEM), and ion probe mass spectrometry (e.g., nanoSIMS), through visualization of the distributions of organics and minerals in the Solar System materials which record the chemical evolution from dusts to planetesimals.

キーワード: 有機物, 太陽系, 分析化学, 小天体, 惑星形成, 可視化

Keywords: Organic compounds, Solar System, Analytical chemistry, small bodies, planetary formation, visualization

原始惑星系円盤における複雑な有機分子生成モデル Formation Process of Complex Organic Molecules in Protoplanetary Disks

野村 英子^{1*}
NOMURA, Hideko^{1*}

¹ 東京工業大学
¹ Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤における化学反応は、太陽系内物質の起源に繋がると考えられる。近年、星間雲の電波遷移線観測により、複雑な有機分子が新たに発見されている一方で、太陽系内の彗星や隕石にもアミノ酸などが見つかった。本研究では、星間雲における有機分子生成モデルを原始惑星系円盤の温度・密度構造に適用し、円盤における複雑な有機分子生成について議論した。具体的には、中心星からの照射を考慮した円盤温度・密度構造モデルをもとに、星間塵表面反応も含めた化学反応ネットワーク計算を行った。その結果、円盤外縁の低温部の星間塵上においては水素付加反応による分子生成が進むのに対し、円盤半径十～数十 AU 付近の暖かな領域においては、星間塵上のラジカル同士の反応による、さらに複雑な有機分子生成が進むことを示した。我々の分子存在量の計算結果を彗星からの有機分子輝線観測の結果と比較したところ、良い一致を示した。また、中心星からの紫外線により塵表面から脱離した分子を ALMA で観測することにより、円盤内の塵表面反応の観測的検証の可能性を示唆した。講演ではさらに、小惑星帯における有機物生成についても議論したい。

キーワード: 原始惑星系円盤, 有機分子生成
Keywords: protoplanetary disks, formation of organic molecules

はやぶさ帰還試料キュレーション状況の報告 Status report of curation of Hayabusa-returned samples

矢田 達^{1*}; 安部 正真¹; 上梶 真之¹; 唐牛 譲¹; 石橋 之宏¹; 岡田 達明¹; 佐竹 渉¹; 藤本 正樹¹
YADA, Toru^{1*}; ABE, Masanao¹; UESUGI, Masayuki¹; KAROUJI, Yuzuru¹; ISHIBASHI, Yukihiko¹; OKADA, Tatsuaki¹; SATAKE, Wataru¹; FUJIMOTO, Masaki¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹ Japan Aerospace Exploration Agency

2010年6月、小惑星探査機「はやぶさ」はS型地球近傍小惑星イトカワより表層粒子試料を地球に帰還させた(Abe et al., 2011)。それ以降、JAXA キュレーションチーム(ESCuTe)では、「はやぶさ」のサンプルキャッチャーからの粒子の回収・記載を進め、現在の所、400個超の粒子が初期記載済みとして公表されている(Yada et al., 2014a)。本発表では、その回収初期記載と試料の配付・研究の現状と今後の予定についてまとめる。

帰還した探査機「はやぶさ」の再突入カプセルから取り出されたサンプルコンテナは、JAXA キュレーションセンター(ESCuC)のクリーンルームにおいて洗浄分解の末、真空環境のクリーンチェンバー第1室で開封され、イトカワ表層物質を収めたサンプルキャッチャーが取り出され、試料のハンドリングを行う高純度窒素環境のクリーンチェンバー第2室へ移された。サンプルキャッチャーは主に、捕獲試料が通過する回転筒と、2回目のタッチダウンの際に捕獲された試料を収めるA室と、1回目のタッチダウン捕獲試料を収めるB室からなる。当初、試料を取り出す為にそれぞれキャッチャーA、B室のフタと同じサイズの合成石英ガラス製の円盤を準備し、そのガラス円盤の上にキャッチャーに振動を与えて内部の粒子を落下させることで回収を行っていた。そのガラス円盤状から、専用に開発した静電制御マイクロコンピュータを用いて、一つ一つ電子顕微鏡用密閉型試料ホルダー上に移動して、SEM-EDSで記載を行い、クリーンチェンバー第2室内のグリッドを切った合成石英ガラス板上に移動し、粒子IDを付けて保管している(Yada et al., 2014b)。このガラス円盤の他に、2013年度にはキャッチャーB室のフタを、専用の電子顕微鏡用密閉型ホルダーに設置してSEM-EDSによりフタ上の粒子を直接記載している。

ガラス円盤を用いた方法は、粒子を記載する為にマイクロコンピュータで1個ずつ移動させる手間とリスクを伴う。この手間とリスクを解消する為、我々は2013年度にキャッチャーA、B室フタと同サイズで、専用の電子顕微鏡用密閉型ホルダーに設置して直接SEM-EDSによる記載が可能な、メタルディスクを開発した。2014年度よりこのディスクによる粒子回収を開始し、最終的には2年強をかけてキャッチャー内の粒子の全容を把握する予定である(Yada T. et al., 2014a)。

JAXA/ESCuTeでは、2012年初頭より全世界の研究者より「はやぶさ」帰還試料について研究プロポーザルを募集し、外部専門家から成る委員会による審査を経て選ばれたプロポーザルに対して試料を配付する、国際公募研究を開始した。現在までほぼ1年に1回のペースで行われており、第3回目の公募が2014年度より開始する予定である。国際公募研究の成果は、2013年より始まったJAXAが主催する国際シンポジウム(Hayabusa 2013: Symposium of Solar System Materials)にて発表され、抄録が国際誌にまとめられる予定である。

また、希少な特徴を持ち、国際公募研究に供する事が難しい試料について、JAXA/ESCuTeの取り纏めの元に2013年よりコンソーシアム研究を開始している。現在の所、最大サイズケイ酸塩粒子、塩を含むケイ酸塩粒子、硫化鉄粒子、リン酸塩を含む粒子の4種類について、コンソーシアム研究が進められている(Uesugi et al., 2013; Yada et al., 2013; Karouji et al., 2013)。今後も別の希少な特徴を持つ試料について、コンソーシアム研究を開始する予定である。

参考文献:

- Abe M. et al. (2011) LPS XLII, Abstract #1638.
- Karouji Y. et al. (2013) 76th Ann. Meteorit. Soc. Meeting, Abstract #5148.
- Uesugi M. et al. (2013) 76th Ann. Meteorit. Soc. Meeting, Abstract #5186.
- Yada T. et al. (2013) 76th Ann. Meteorit. Soc. Meeting, Abstract #5150.
- Yada T. et al. (2014a) LPS XLV, Abstract #1759.
- Yada T. et al. (2014b) MAPS, in press.

キーワード: はやぶさ, 小惑星, キュレーション, サンプルリターン
Keywords: Hayabusa, asteroid, curation, sample return

はやぶさ帰還試料中の炭素質物質の起源同定の試み Examination of the origin of carbonaceous particles in Hayabusa-returned samples

上相 真之^{1*}; 奈良岡 浩²; 伊藤 元雄³; 藪田 ひかる⁴; 北島 富美雄²; 高野 淑識³; 三田 肇⁵; 癸生川 陽子⁶; 矢田 達¹; 唐牛 讓¹; 石橋 之宏¹; 佐竹 渉⁷; 岡田 達明¹; 安部 正真¹
UESUGI, Masayuki^{1*}; NARAOKA, Hiroshi²; ITO, Motoo³; YABUTA, Hikaru⁴; KITAJIMA, Fumio²; TAKANO, Yoshinori³; MITA, Hajime⁵; KEBUKAWA, Yoko⁶; YADA, Toru¹; KAROUJI, Yuzuru¹; ISHIBASHI, Yukihiro¹; SATAKE, Wataru⁷; OKADA, Tatsuaki¹; ABE, Masanao¹

¹ 独立行政法人宇宙航空研究開発機構, ² 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ³ 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ⁴ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ⁵ 福岡工業大学工学部生命環境科学科, ⁶ 北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学専攻 地球惑星システム科学, ⁷ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Japan aerospace exploration agency, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ³Kochi Institute for Core Sample Research JAMSTEC, ⁴Osaka University, Department of Earth and Space Science, ⁵Fukuoka Institute of Technology, Faculty of Engineering, Department of Life, Environment and Mater, ⁶Department of Natural History Sciences Hokkaido University, ⁷Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

Extraterrestrial Sample Curation Team (ESCuTe) recovered more than 50 carbonaceous particles from the sample catcher of the Hayabusa spacecraft. Those carbonaceous materials, named as category 3, were found in the form of particles with similar size range of the silicate particles those confirmed as Itokawa regolith particles. Initial description by the SEM-EDS analysis shows variable textures and chemical compositions of them, suggesting the multiple origins of the carbonaceous materials.

Preliminary examinations of category 3 particles were carefully processed in parallel with those of silicate materials. However, we could not obtain the information for the origin of category 3 particles before the opening of international announcement of opportunity (A/O). The ESCuTe and preliminary examination team of category 3 particles have continued the investigations. In this paper, we report the several recent results obtained from the sequential analyses.

Samples allocated for the preliminary examinations of category 3 are RA-QD02-0008, RA-QD02-0120, RA-QD02-0180, RB-QD04-0001, RB-QD04-0037-01 and RB-QD04-0047-02. RA-QD02-0008 was lost during the manipulation at first preliminary examination. Three samples, RA-QD02-0120, RB-QD04-0001, and RB-QD04-0047-02, were pressed on the Au plate and fixed without any adhesive materials. We analyzed H, C and N isotopic composition by nano-SIMS in the beginning of the sequential study, in order to investigate the isotopic anomaly which is a direct evidence of extraterrestrial origin of organic materials [8]. FT-IR and micro-Raman spectroscopy were also applied for the pressed samples [9]. After ToF-SIMS analysis of those particles, the samples were sliced by FIB in order to investigate the fine structure of the samples by XANES and TEM/STEM [10].

We performed those analyses with determining the effect on the subsequent analyses, such as sample damages and contaminations. The rest two particles, RA-QD02-0180 and RB-QD04-0037-01 were pressed on indium plates, because significant disturbance by Au on the ToF-SIMS analyses was found. We will also report the construction of the sequential analysis flow of tiny carbonaceous particles.

In parallel with the Hayabusa-returned particles, we processed observation and analysis of insoluble organic matter (IOM) of A881458 (CM2) and several possible materials of the origin of the category 3 particles, such as viton, silicon rubber, vectran and particles collected from the Hayabusa2 clean room.

We did not obtain any signature of extraterrestrial origin from category 3 particles so far. We are planning to continue the preliminary examination of category 3 by the end of March 2014. We are also planning to open the category 3 particles to the future International A/O, with the data of preliminary examinations before the end of 2014.

References: [1] Yada et al. 2011. *Meteoritics & Planetary Science* 32:A74. [2] Nakamura et al. 2011. *Science* 333:1113-1116. [3] Yurimoto et al. 2011. *Science* 333:1116-1119. [4] Ebihara et al. 2011. *Science* 333:1119-1121. [5] Noguchi et al. (2011) *Science* 333:1121-1125. [6] Tsuchiyama et al. 2011. *Science* 333:1125-1128. [7] Nagao et al. 2011. *Science* 333:1128-1131. [8] Ito et al. 2013. Abstract of Hayabusa Symposium, [9] Kitajima et al., 2013 Abstract of Hayabusa Symposium, [10] Uesugi et al. 2013. Abstract of Hayabusa Symposium

はやぶさカテゴリ3有機物試料中の水素、炭素と窒素同位体組成 H, C and N isotopic compositions of HAYABUSA Category 3 organic samples

伊藤 元雄^{1*}; 上相 真之²; 奈良岡 浩³; 藪田 ひかる⁴; 北島 富美雄³; 三田 肇⁵; 高野 淑識⁶; 唐牛 讓²; 矢田 達²; 石橋 之宏²; 岡田 達明²; 安部 正真²

ITO, Motoo^{1*}; UESUGI, Masayuki²; NARAOKA, Hiroshi³; YABUTA, Hikaru⁴; KITAJIMA, Fumio³; MITA, Hajime⁵; TAKANO, Yoshinori⁶; KAROUJI, Yuzuru²; YADA, Toru²; ISHIBASHI, Yukihiko²; OKADA, Tatsuaki²; ABE, Masanao²

¹ 海洋研究開発機構 高知コア研究所, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ⁴ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ⁵ 福岡工業大学工学部生命環境科学科, ⁶ 海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域

¹Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ⁴Osaka University, Department of Earth and Space Science, ⁵Fukuoka Institute of Technology, Department of Life, Environment and Materials Science, ⁶Institute of Biogeosciences, JAMSTEC

Hayabusa spacecraft had brought back asteroid Itokawa particles to the Earth on June 2010. More than 1,500 mineral particles were identified on the Qz glass after the compulsive free fall, and most of them were very small ranging from 10 to 300 μm but are mostly smaller than 50 μm (Nakamura et al., 2011). In addition several amount of carbonaceous materials were found that is called Category 3. Based on FE-SEM and EDS observations at JAXA Extraterrestrial Sample Curation Team, those samples mainly composed of C, N, O and some of them contain NaCl and KCl (JAXA Hayabusa sample catalogue).

H, C and N isotopic compositions of extraterrestrial organic materials in Stardust cometary samples (McKeegan et al., 2006), IDPs (Messenger, 2000), IOM (Busemann et al. 2006) and nanoglobules in primitive chondrite (Nakamura-Messenger et al., 2006) provide a clue for understanding of origin and nature of the Solar System. Large D and ¹⁵N isotopic enrichments were observed, and C isotope is slightly enriched in ¹³C in extraterrestrial organic materials (Pizzarello, 2005). Those data suggest that extraterrestrial organics are probably interstellar material that was survived through formation processes (planetesimals) of the Solar System (Sanford et al., 2001), and may also have material that formed in the cold molecular cloud region of the protoplanetary disk (Aikawa et al., 2002).

Here we report H, C and N isotopic measurement of organic materials from Hayabusa Category 3 samples, RB-QD04-0047-02, RA-QD02-0120 and RB-QD04-0001, by an ion imaging with the JAMSTEC NanoSIMS ion microprobe. The purposes of this study are to evaluate terrestrial contaminations in the Hayabusa spacecraft and in the JAXA curation facility, and to find extraterrestrial organic materials on the basis of H, C and N isotope measurements.

Each Hayabusa organic sample was pressed on Au plate together with terrestrial organic standards of 1-hydroxybenzotriazole hydrate and BBOT with known H, C and N isotopic compositions. Following the SEM study to check the sample condition, texture and morphology, the samples were analyzed for H, C and N isotopic compositions by an isotopic imaging with the JAMSTEC NanoSIMS 50L at Kochi Institute for Core Sample Research.

We studied three Hayabusa organic samples, RB-QD04-0047-02, RA-QD02-0120 and RB-QD04-0001. All of the samples have been initially investigated by a FE-SEM and EDX observation at JAXA Hayabusa curation facility, and the EDX spectra of the samples contain C, N and O; the dominant elements are C, and N (Hayabusa sample catalogue).

Based on NanoSIMS isotopic images of H, C and N in RB-QD04-0047-02, RA-QD02-0120 and RB-QD04-0001, all three samples show homogeneous and terrestrial H, C and N isotopic compositions within an error ($\delta\text{D} = 60 \pm 13$ permil, $\delta^{13}\text{C} = 3 \pm 3$ permil and $\delta^{15}\text{N} = -4 \pm 2$ permil for RB-QD04-0047-02; $\delta\text{D} = 81 \pm 54$ permil, $\delta^{13}\text{C} = -20 \pm 8$ permil and $\delta^{15}\text{N} = 2 \pm 2$ permil for RA-QD02-0120; $\delta\text{D} = 135 \pm 32$ permil, $\delta^{13}\text{C} = -20 \pm 9$ permil and $\delta^{15}\text{N} = 16 \pm 12$ permil for RB-QD04-0001).

The IOMs in CI and CM chondrites show heterogeneous distributions of delta-D at the molecular (Remusat et al. 2009) and micron scale level (Busemann et al., 2006). The IOMs of CR, CM and CI have D and ¹⁵N isotopic enrichments in micron-sized regions (hot spots). The IOMs in ordinary chondrites are heterogeneous, however, they do not show many micron-scale anomalies as IOMs in carbonaceous chondrite (Remusat et al., 2013). It is obvious that H, C and N isotope signatures of Hayabusa organic samples are different from those of IOMs in carbonaceous and ordinary chondrites: i.e., No hot spots, terrestrial values for H, C and N isotopes.

We have not found strong evidence of extraterrestrial origin because isotope compositions of H, C and N in Hayabusa organic samples show terrestrial values, and homogeneous distributions of H, C and N in the samples, which are unlike to IOM in various types of chondrites.

メインベルト小惑星のアルベド分布の傾向 Albedo properties of main belt asteroids based on the infrared all-sky surveyors

白井 文彦^{1*}
USUI, Fumihiko^{1*}

¹ 東京大学
¹University of Tokyo

Presently, the number of asteroids is known to be more than 620,000, and more than 90% of asteroids are classified as the main-belt asteroids (MBAs). The spatial distribution of compositions among MBAs is of particular interest, because the main belt is the largest reservoir of asteroids in the solar system. Asteroids are thought to be the remnants of planetesimals formed in the early solar system, and have a clue to study the formation and evolution of asteroids, origin of meteoroids and the near-Earth asteroids, as well as the formation of the solar system. Size and albedo are one of the most basic physical quantities of asteroid. Knowledge of size and albedo is essential in many fields of asteroid research, such as chemical composition and mineralogy, the size-frequency distribution of dynamical families and populations of asteroids, and the relationship between asteroids in the outer solar system and comets.

Several techniques have been developed to determine the size of asteroids. One of the most effective methods for measuring asteroidal size and albedo indirectly is through the use of radiometry, where a combination of the thermal infrared flux and the absolute magnitude as the reflected sunlight. Using radiometric measurements, a large number of objects can be observed in a short period of time, providing coherent data for large populations of asteroids within the asteroid belt. Infrared observations can be made still better under ideal circumstances, from space. The first space-borne infrared telescope is the Infrared Astronomical Satellite (IRAS; Neugebauer et al. 1984), launched in 1983 and performed a survey of the entire sky. To date, there are two other infrared astronomical satellites dedicated to all-sky survey: the Japanese infrared satellite AKARI (Murakami et al. 2007), and the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE; Wright et al. 2010). Based on the all-sky survey data obtained by IRAS, AKARI, and WISE, the largest asteroid catalogs containing size and albedo data were constructed (e.g., Tedesco et al. 2002; Usui et al. 2011; Mainzer et al. 2011). The total number of asteroids detected with size and albedo information with these three surveyors is 138,285, which is 22% of currently known asteroids with orbits.

In addition, several outstanding works have provided the taxonomic classification of asteroids (e.g., Tholen 1989; Bus & Binzel 2002; Lazzaro et al. 2004; Carvano et al. 2010), based on ground-based spectroscopic observations within optical and near-infrared wavelengths. Along with these taxonomic classifications, size and albedo data also contribute to our understanding of asteroid compositions. In general, the albedo of C-types is considered as low and that of S-types is high (e.g., Zellner & Gradie 1976). The relationship between taxonomic types and albedo is, however, complex and type determinations cannot be made on the basis of albedo values alone. Recently albedos of C- and S-type asteroids are found to vary widely, especially for sizes smaller than several tens km (Usui et al. 2013). Furthermore, in spite of the albedo transition process like space weathering, the heliocentric distribution of the mean albedo of asteroids in each taxonomic type is found to be nearly flat. In the total distribution, on the other hand, the mean albedo value gradually decreases with increasing the semimajor axis, presumably due to the compositional mixing ratios of taxonomic types.

In this talk, we present the details of data compiling of size, albedo, and taxonomy of MBAs, and discuss the compositional distribution in the main belt regions.

キーワード: 小惑星, メインベルト, 赤外線サーベイ, サイズ・アルベド, スペクトルタイプ分類
Keywords: asteroids, main belt, infrared surveys, size and albedo, taxonomic classifications

内側小惑星帯のベストイドのライトカーブサーベイ Lightcurve Survey of Vestoids in the Inner Asteroid Belt

長谷川直^{1*}; 宮坂 正大²; 三戸 洋之³; 猿楽 祐樹¹; 小澤 友彦⁴; 黒田 大介⁵; 吉田 道利⁶; 柳澤 顕史⁵; 清水 康広⁵; 長山 省吾⁵; 戸田 博之⁵; 沖田 喜一⁵; 河合 誠之⁷; 関口 朋彦⁸; 石黒 正晃⁹; 安部 正真¹
HASEGAWA, Sunao^{1*}; MIYASAKA, Seidai²; MITO, Hiroyuki³; SARUGAKU, Yuki¹; OZAWA, Tomohiko⁴; KURODA, Daisuke⁵; YOSHIDA, Michitoshi⁶; YANAGISAWA, Kenshi⁵; SHIMIZU, Yasuhiro⁵; NAGAYAMA, Shogo⁵; TODA, Hiroyuki⁵; OKITA, Kouji⁵; KAWAI, Nobuyuki⁷; SEKIGUCHI, Tomohiko⁸; ISHIGURO, Masateru⁹; ABE, Masanao¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 東京都庁, ³ 東京大学木曾観測所, ⁴ みさと天文台, ⁵ 国立天文台岡山天体物理観測所, ⁶ 広島大学宇宙科学センター, ⁷ 東京工業大学理工学研究科, ⁸ 北海道教育大学教育学部, ⁹ ソウル大学物理天文学科
¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²Tokyo Metropolitan Government, ³Kiso Observatory, Institute of Astronomy, The University of Tokyo, ⁴Misato Observatory, ⁵Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory, ⁶Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, ⁷Graduate School of engineering, , Tokyo Institute of Technology, ⁸Asahikawa Campus, Hokkaido University of Education, ⁹Department of Physical and Astronomy, Seoul National University

We have made the lightcurve observation of 13 vestoids ((1933) Tinchin, (2011) Veteraniya, (2508) Alupka, (3657) Ermolova, (3900) Knezevic, (4005) Dyagilev, (4383) Suruga, (4434) Nikulin, (4796) Lewis, (6331) 1992 FZ₁, (8645) 1998 TN, (10285) Renemichelsen, and (10320) Reiland).

Lightcurves in the R-band of rotation periods were found for (1933) Tinchin, (2011) Veteraniya, (2508) Alupka, (3657) Ermolova, (3900) Knezevic, (4005) Dyagilev, (4383) Suruga, (4796) Lewis, (6331) 1992 FZ₁, (8645) 1998 TN, and (10320) Reiland.

The distribution of rotational rates of 59 vestoids in the inner main belt, including 29 members of the Vesta family that are regarded as ejecta from the asteroid (4) Vesta, is inconsistent with the best-fit Maxwellian distribution.

This inconsistency may be due to the effect of thermal radiation Yarkovsky- O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP) torques, and implies that the collision event that formed vestoids is sub-billion to several billion years in age.

キーワード: 小惑星, ベスタ

Keywords: asteroid, vesta

ロケット実験 CIBER による黄道光の近赤外線スペクトル観測 Near-infrared spectral measurements of zodiacal light by CIBER rocket experiments

松浦周二^{1*}; 新井俊明¹; 大西陽介¹; 白旗麻衣¹; 津村耕司¹; 松本敏雄²; Bock James³; CIBER チーム³
MATSUURA, Shuji^{1*}; ARAI, Toshiaki¹; ONISHI, Yosuke¹; SHIRAHATA, Mai¹; TSUMURA, Kohji¹; MATSUMOTO,
Toshio²; BOCK, James³; CIBER, Team³

¹宇宙航空研究開発機構, ²ASIAA, ³カリフォルニア工科大学
¹JAXA, ²ASIAA, ³Caltech

我々は、太陽系から銀河系外にいたるあらゆる赤外線の宇宙拡散放射を、視線方向の積分である宇宙赤外線背景放射として、ロケット実験 CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment) により観測した。CIBER 実験の目的のひとつは、宇宙赤外線背景放射を構成する放射成分のうち、惑星間ダストによる太陽光散乱である黄道光を観測することである。これまでに実施した CIBER 実験により、波長 0.8-2 μ m の近赤外線における黄道光の放射スペクトルと偏光度を観測することに初めて成功した。本講演では、その観測結果について報告する。

CIBER 実験は、日米韓の国際共同実験として、NASA の観測ロケットプログラムのもと実施した。2009 年から 2013 年までに 4 回の実験を行い、全ての実験において高度 200km 以上での地球大気の影響がない良好な観測データを取得できた。CIBER 実験の主目的である銀河系外の拡散放射を検出する要求から、観測天域を黄道光が比較的暗い太陽離角 90 度以上に限ったが、黄緯に対する輝度の依存性を利用して、様々な放射成分を含む観測値から黄道光を成分分離した。その結果、黄道光の連続スペクトルと偏光度を取得するとともに、輝度の季節変化に関する情報を得た。

観測された黄道光の赤外線放射スペクトルには、有為な黄緯依存性や季節変化がなく、太陽スペクトルに対して波長 1.5 μ m より短波長における明らかな赤化が見られた。この結果から、放射源である惑星間ダストは、ミクロンサイズ以上の大きさを持つとともに、短波長での鉱物吸収の存在を示している。偏光度は黄極において最大の 20-25% が観測され、可視域での過去の測定値と比較して同等以上であることがわかった。また、偏光度には有為な波長依存性はなく、この点においても観測波長よりも十分大きい惑星間ダストが主であることが示唆される。

本講演では、観測結果を報告するとともに、これを隕石や彗星ダストの反射スペクトルや偏光の観測と比較し、惑星間ダストの光学特性について議論する。

キーワード: 黄道光, 惑星間ダスト, 赤外線, 観測

Keywords: zodiacal light, interplanetary dust, infrared, observation

反射スペクトルから見た木星小衛星の起源 Reflectance Spectra of Jovian Small Satellites and Implication of their Origin

高遠 徳尚^{1*}; 寺田 宏¹; 吉田 二美¹; 大槻 圭史²
TAKATO, Naruhisa^{1*}; TERADA, Hiroshi¹; YOSHIDA, Fumi¹; OHTSUKI, Keiji²

¹ 国立天文台, ² 神戸大学

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Kobe Univ.

1. はじめに 木星にはガリレオ衛星より内側を回る4つの小衛星と、その外側を回る多数の不規則衛星が存在する。力学的な考察と測光データから、これらの衛星は木星系外の天体が捕獲されたものと考えられている。しかしそれを証明する直接的証拠に欠けており、また太陽系内のどの領域で形成された天体をどのようなプロセスで捕獲したのかも未だ解明されていない。木星の不規則衛星の成因を解明することは、Niceモデルに見られるような太陽系内の動径方向の物質移動の理論に関して重要な制限を与えることができる点でも重要である。本研究では、Thebeの波長3 μm 帯での狭帯域測光観測を行い、水質変性鉱物の存在を確認するとともに、今まで分光観測がなされていなかった主要な不規則衛星の可視分光観測を行い、そのスペクトル型を正確に決定し、木星周辺の小惑星（ヒルダ群、トロヤ群）との比較を行った。

2. 観測と結果

(1) Thebeの3 μm 帯狭帯域測光観測

Thebeは暗くかつ木星に近いので、8m望遠鏡でも3 μm 帯の分光観測は困難である。そこでSubaru IRCSのH₂O Iceフィルター($\lambda = 2.974\text{--}3.126 \mu\text{m}$)とKバンドフィルターによる測光観測から、3 μm 帯の吸収の深さを求めた(観測は2005年5月25日UTに行った)。その結果ThebeにもAmaltheaと同様に3 μm 帯に吸収があり、3.05 μm の反射率はKバンドの0.67倍であることが分かった。この方法の有効性は、スペクトルが既知のAmaltheaと同様に観測することで確認している。

(2) 不規則衛星の可視分光観測

順行衛星のHimalia family(5天体中4天体)とThemisto、逆行衛星のCarme, Kalyke(Carme family), Ananke, Pasiphae(それぞれのfamilyの代表), Sinope, Callirrhoeの11天体、およびAmalthea(今までに可視光スペクトルが得られていなかった)を、2012年12月7日UT及び2014年12月21日UTにSubaru/FOCASを用いて分光観測($\lambda = 0.38\text{--}0.9 \mu\text{m}$, 一部天体は $\lambda = 0.48\text{--}0.9 \mu\text{m}$, スリット幅2")を行った。その結果、Himalia familyは広義のCタイプ、同じ順行のThemistoはDタイプ、逆行衛星はAnankeがC, PasiphaeがX, その他はDタイプであることが分かった。Amaltheaは過去に得られたデータと合わせてみると、波長0.6-2.4 μm で見るとDタイプと良く一致するが、波長0.6 μm 以下では急激に反射率が減少している。また3 μm 帯に深い吸収があるのが特徴である。

3. 考察 ガリレオ衛星より内側を回るAmalthea, Thebeと、Dタイプ小惑星とのスペクトル上の大きな違いは3 μm 帯の吸収(水質変性鉱物による)と考えられる)の有無である。これらの小衛星は小惑星から木星が捕獲した天体そのものではなく、木星系円盤の一部となってガリレオ衛星の材料にもなった、円盤内でかなりプロセス(衝突合体、加熱)された天体が木星に落ちてきたものと考えの方が自然である。AmaltheaのスペクトルがCalistoの氷が少ない領域のスペクトルと類似していることも、この考えを支持している。

不規則衛星は木星が小惑星から捕獲したと考えられているが、どこからいつ捕獲したのかは分かっていない。可能性が高いのは現在の木星の近くに存在するトロヤ群あるいはヒルダ群である。これらの小惑星のスペクトルタイプは不規則衛星と似ているものが多い。Grav et al.(2012)によると、どちらの群もC, Pタイプ(～Xタイプ)とDタイプとで構成されていて、Dタイプの割合(個数の割合)は直径が大きいほど少なくなるが、トロヤ群の方が全体としてDタイプの割合が多く、また直径によるDタイプの割合の減少の仕方が緩い(直径20 km以上の天体でDタイプの割合は、トロヤ群約85%、ヒルダ群約75%であるが、直径100 km以上ではトロヤ群約70%に対しヒルダ群は約10%である)。

我々の観測結果からC, XタイプとDタイプの割合を直径の関数として求めると、木星の不規則衛星はヒルダ群の分布と良く一致することが分かった。全く違った起源からスペクトルタイプ-サイズ分布を再現するのは容易ではないと思われるので、この結果は木星の不規則衛星がヒルダ群と共通の供給源から捕獲されたことを強く示唆している。と

4. まとめ

(1) Amalthea, Thebeなどのガリレオ衛星の内側を回る小衛星は、木星系円盤内でプロセスされた微衛星の残骸である可能性が高い。

(2) ガリレオ衛星の外側を回る不規則衛星は、トロヤ群ではなくヒルダ群と共通の供給源から捕獲された天体の可能性が高い。

キーワード: 衛星, 木星, スペクトル, ヒルダ群, トロヤ群
Keywords: satellites, Jupiter, spectrum, Hilda group, Trojan

含水ケイ酸塩鉱物に対する太陽風プロトンによる風化作用の影響 Weathering effect of solar wind proton on hydrated silicate minerals

仲内 悠祐^{1*}; 安部 正真²; 北里 宏平³; 土山 明⁴; 安田 啓介⁵

NAKAUCHI, Yusuke^{1*}; ABE, Masanao²; KITAZATO, Kohei³; TSUCHIYAMA, Akira⁴; YASUDA, Keisuke⁵

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 会津大学, ⁴ 京都大学, ⁵ 若狭湾エネルギー研究センター

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³University of Aizu, ⁴Kyoto University,

⁵The Wakasa Wan Energy Reserch Center

NIRS3 is an on-board near infrared spectrometer of Hayabusa-2 project which is aimed at returning samples from C-type asteroid 1999 JU3. In this project, it is important to characterize mineralogical and heterogeneities on the asteroid surface for the sampling site selection. Observing wavelength of NIRS3 is including the 3 μm band which is charactering C-type asteroid (*Rivkin et al. LPSC 2002, Milliken et al. 2007*). The NIRS3 will measure reflectance spectra of asteroid surface in the wavelength range of 1.8 - 3.2 μm . This wavelength region includes features mainly related to OH and H₂O.

The spectral properties of the surface, however, would have different trend to the subsurface, because the surface of asteroids would be exposed to solar wind and micrometeorite. As for the reflectance spectrum of the moon, the absorption feature from 2.8 μm to 3.0 μm was reported in M³ data (*Pieters et al. 2009*). It is thought that the implantation of solar wind proton is one of the causes (*McCord et al. 2011*). The solar wind protons will affect the spectral shape of 3 μm region of air less bodies. Thus we study effect of irradiation of solar wind protons on near-infrared reflectance spectra by laboratory experiment.

We executed the simulation of irradiation of solar wind protons using ion implantation device at the Wakasa Wan Energy Research Center (WERC), Fukui. This device can irradiate H₂⁺ beam with 10 keV in a vacuum (under 1×10^{-5} Pa). The total amount of H₂⁺ was about 10¹⁸ ion/cm². Three samples were prepared; olivine (San Carlos, Arizona), antigorite (Sangenchaya, Kyoto), saponite (synthetic: Kunimine Industries Co., Ltd.). Antigorite and saponite were sieved between 50 μm and 75 μm and olivine served between 75 μm and 105 μm , and then they were heated for 24 hours at 423 K. They were packed into Cu cups and formed pellets. After irradiated the spectra were measured using FTIR, which resolution was 2.0 cm⁻¹ in wavenumber. We adopted the analysis method of *Ichimura et al. (2012)*, which is to compare the reflectance spectra of altered sample, R, with unaltered sample, R₀, to determine the alteration ratio of spectra, R/R₀, without absorption water.

The alteration ratios of irradiated samples were different between minerals. The alteration ratio of olivine showed increasing of broad absorption feature from 2.8 μm to 3.8 μm due to OH/H₂O production. In antigorite and saponite, the alteration ratio, additionally, showed characteristic change related to coupling state of -OH. In the alteration ratio of antigorite, stretching of -OH bonded water molecule (-OH \cdots ^HOH) at 2.77 μm and stretching of -OH \cdots ^HOSi at 2.85 μm was increased conspicuously. On the other hands, the alteration ratio of saponite was changed conspicuously at 2.77 μm .

We think that the difference of the bands which showed conspicuously change is related with structure of minerals. Antigorite have -OH into the crystal. Therefore the irradiated protons broke bonds of Si-O and produced newer hydrogen bonds which are -OH \cdots ^HOH or -OH \cdots ^HOSi. Saponite has H₂O as interlayer water. It would be similarly broken bands of Si-O and produced newer hydrogen bonds which are -OH \cdots ^HOH. These spectral changes can explain same process. These features support that the irradiated protons react with bonds of Si-O in the crystal.

In this study, we showed that the alteration of feature related with OH/H₂O is different from each mineral. Next step, we will examine the other minerals against determination minerals and the amount of water from reflectance spectra.

キーワード: はやぶさ 2, 宇宙風化, 太陽風, 水, C 型小惑星, 照射実験

Keywords: Hayabusa-2, space weathering, solar wind, OH/H₂O, C-type Asteroid, proton implantation

ナノ秒パルスレーザー照射実験による宇宙風化作用において硫化鉄の果たす役割の検証 The effect of coexisting iron sulfide on space weathering by nanosecond pulse laser irradiation

岡崎 瑞祈^{1*}; 佐々木 晶¹; 廣井 孝弘²
OKAZAKI, Mizuki^{1*}; SASAKI, Sho¹; HIROI, Takahiro²

¹ 大阪大学理学研究科, ² ブラウン大学
¹School of Science, Osaka University, ²Brown University

大気のない天体表面が、太陽風や微小隕石の衝突などにより見た目の色や明るさが変化していく現象を宇宙風化作用という。存在度から普通コンドライトはS型小惑星由来と考えられているが、スペクトルは一致せず、S型小惑星はスペクトルが赤化・暗化・吸収帯が弱くなっているということが議論されてきた。宇宙風化作用を受けた鉱物表面には、ナノ鉄微粒子が生成していることが月のソイルからも見られているが、ナノ秒パルスレーザーを鉱物表面に照射するとナノ鉄微粒子を実験的に生成することができ、宇宙風化作用のスペクトル変化を再現出来る。

また、はやぶさが小惑星イトカワから持ち帰った微粒子の宇宙風化された表面の電子顕微鏡観察・元素分析から、ナノ鉄微粒子を含むアモルファス層の外側に硫化鉄のナノ微粒子を含む層が発見された。また別に数10 μ mサイズの硫化鉄の結晶も見つかっており、硫黄に関して興味深い事実が明らかになっている。ここから、硫黄は揮発性に富むため天体表面で起こる宇宙風化作用に関係があるのではと推測し、パルスレーザーを用いて風化させ分光装置でスペクトルをとる室内実験を行った。

粒子サイズ45~75 μ mのカンラン石、輝石に同サイズの硫化鉄を10%、20%混ぜたペレットを作成しナノ秒パルスレーザーを照射してスペクトル変化を引き起こした。また対照実験として同サイズの鉄を10%、20%混ぜたものや、粒子サイズ45 μ m以下の硫化鉄を混ぜたものでも実験を行った。

その結果から、硫黄が含まれる場合は、スペクトルが赤化も強く、また近赤外領域も暗化していることが確認された。

鉄のみが含まれる場合は赤化は見られるものの暗化は見られないのに対し、硫化鉄が含まれる場合では赤化に加え、レーザー照射前に比べ20%の暗化も見られた。これまで赤化に注目されてきた宇宙風化作用だが、硫化鉄が加わった場合では暗化も見られ、風化が強まることが確認できた。赤化に関してはナノ鉄（もしくは硫化鉄）微粒子の存在が考えられるが、全体的な暗化に関しては検討中である。

図： パルスレーザーを照射したサンプル

キーワード: 宇宙風化作用, 硫化鉄, レーザー照射実験, 小惑星, イトカワ
Keywords: space weathering, iron sulfide, experiments using pulse laser, asteroids, Itokawa

