

Thermal Infrared Imager TIR on Hayabsua2 and Its In-Flight Performance using Earth-Moon Thermal Images.

Thermal Infrared Imager TIR on Hayabsua2 and Its In-Flight Performance using Earth-Moon Thermal Images.

*岡田 達明^{1,9}、福原 哲哉²、田中 智^{1,9}、田口 真³、今村 剛^{1,9}、荒井 武彦⁸、千秋 博紀⁴、小川 佳子⁵、出村 裕英⁵、北里 宏平⁵、中村 良介⁶、神山 徹⁶、関口 朋彦⁷、長谷川 直¹、松永 恒雄⁸、和田 武彦¹、滝田 隼⁹、坂谷 直哉¹、堀川 大和¹⁰、遠藤 憲⁵、ヘルバート ヨルン¹¹、ミュラー トマス¹²、ハゲルマン アクセル¹³
 *Tatsuaki Okada^{1,9}, Tetsuya Fukuhara², Satoshi Tanaka^{1,9}, Makoto Taguchi³, Takeshi Imamura^{1,9}, Takehiko Arai⁸, Hiroki Senshu⁴, Yoshiko Ogawa⁵, Hirohide Demura⁵, Kohei Kitazato⁵, Ryosuke Nakamura⁶, Toru Kouyama⁶, Tomohiko Sekiguchi⁷, Sunao Hasegawa¹, Tsuneo Matsunaga⁸, Takehiko Wada¹, Jun Takita⁹, Naoya Sakatani¹, Yamato Horikawa¹⁰, Ken Endo⁵, Joern Helbert¹¹, Thomas G. Mueller¹², Axel Hagermann¹³

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、2.情報通信研究機構、3.立教大学、4.千葉工業大学、5.会津大学、6.産業技術総合研究機構、7.北海道教育大学、8.国立環境研究所、9.東京大学、10.総合研究大学院大学、11.ドイツ航空宇宙センター、12.マックスプランク地球外物理学研究所、13.オープン大学

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.National Institute of Information and Communications Technology, 3.Rikkyo University, 4.Chiba Institute of Technology, 5.University of Aizu, 6.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 7.Hokkaido University of Education, 8.National Institute of Environmental Studies, 9.University of Tokyo, 10.Graduate University for Advanced Studies, 11.German Aerospace Center, 12.Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics, 13.Open University

Thermal infrared imager TIR is a remote instrument on Hayabusa2 sample return mission from C-type near-Earth asteroid 162173 Ryugu, organized by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) [1]. The instrument is based on the uncooled micro-bolometer array inherited from the Longwave Infrared Camera LIR on Akatsuki Venus Orbiter [2]. TIR is to observe thermal emission off the asteroid surface, and investigate its thermo-physical properties. We report here the results of in-flight performance of TIR, especially for observations of Earth and Moon.

TIR consists of the sensor unit (TIR-S) and the power supply unit (TIR-AE), along with the digital electronics (DE) for image data processing and the interface for telemetry and command. A couple of images are taken with its shutter open and close so that an effective thermal image is consequently derived by subtraction of these two images [3].

TIR covers its wide temperature from 150 to 460 K, meaning all the sunlit areas of Ryugu, and even the shadowed areas if the thermal inertia of the surface is higher than 50 [$\text{tiu} = \text{J m}^{-2} \text{s}^{-0.5} \text{K}^{-1}$]. Field of view of TIR is $16.7^\circ \times 12.7^\circ$ in horizontal and vertical directions with 328×248 effective pixels, with IFOV of 0.051° per pixel. This corresponds to about 17 m per pixel from the Home Position, 20 km altitude from asteroid surface. The closest view by TIR is about 1cm from the 10 m altitude during the final approach to touchdown [3].

Performance of TIR has been checked almost monthly. We controlled its temperatures by adjusting the setting points of Heater Control Electronics HCE of Hayabusa2 to investigate temperature dependency of TIR images. TIR observed the deep sky during the checks. TIR images have peripheral brightening due to thermal emission from the hood and optics of TIR. We found the lower detection temperature limit of TIR is about 150K. The effect of peripheral brightening is thoroughly reduced from TIR images by subtracting a deep sky image taken at the same temperature settings. TIR was mounted on the +Y panel of Hayabusa2 spacecraft and pointed to -Z axis. The -Z axis alignment of TIR was surveyed using the images of Earth and Moon taken before and after the Earth swing-by. Alignment of

TIR in -Z axis is checked relative to that of spacecraft, and proven within 1 or 2 pixels (0.05° or 0.10°) shifted in horizontal and vertical directions [4]. It was the unique opportunity for TIR to observe the Earth and Moon, which are the only targets with known thermo-physical properties in space before arrival at Ryugu. TIR images were taken a few minutes before the Optical Navigation Camera (ONC-T) to compare TIR and ONC-T images. In the Earth's images, Australian Continent is hotter than the surrounding ocean by 10 to 20 °C, the Antarctica is cold at around -45 to -40 °C, the southern Indian Ocean is about 0 °C. Clouds are about -45 to -30 °C. The Moon was imaged only 5 pixels in diameter, but the highest temperature can be estimated as 60 to 70 °C for the area at medium latitude. This is consistent with the estimated value for the area. The observations of Earth and Moon by TIR show that the surface temperatures are consistent with the estimated values. Thus we believe that thermal images by TIR are expected to make an essential contribution as planned for the exploration of asteroid Ryugu.

Acknowledgments: This research is partly supported by the Grant-in-Aid for Scientific Research (B), No. 26287108, of the Japan Society for the Promotion of Science.

References: [1] Tsuda Y. et al. (2013) *Acta. Astronautica*, 91, 356-362. [2] Fukuhara T. et al. (2011) *Earth Planets Space*, 63, 1009-1018. [3] Okada T. et al. (2016) *submitted to Space Sci. Review*. [4] Arai T. et al. (2016) *Lunar Planetary Sci. Conf.*, submitted.

キーワード：はやぶさ2、小惑星探査、熱撮像、中間赤外カメラ、地球スイングバイ、熱慣性

Keywords: Hayabusa2, asteroid exploration, thermograph, Thermal Infrared Imager, Earth Swing-by, thermal inertia

はやぶさ 2 中間赤外カメラTIR画像データベースブラウザ

Image and database browser for TIR on Hayabusa2

*遠藤 憲¹、平田 成¹、上野 航¹、出村 裕英¹、荒井 武彦²、岡田 達明³、田中 智⁴*Ken Endo¹, Naru Hirata¹, Wataru Ueno¹, Hirohide Demura¹, Takehiko Arai², Tatsuaki Okada³, Satoshi Tanaka⁴

1.公立大学法人会津大学、2.国立環境研究所 環境計測研究センター 環境情報解析研究室、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所固体惑星科学研究所

1.The University of Aizu, 2.National Institute for Environmental Studies, 3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Department of Solid Planetary Sciences Institute of Space and Astronautical Science

1

Introduction: Hayabusa2 was launched to an asteroid, Ryugu. The spacecraft will arrive at the asteroid in 2018 [1]. Hayabusa2 TIR (Thermal Infrared Imager) [2] science team should complete preparations of analysis. The preparations include development of TIR image viewer and establishment of TIR calibration procedures. Those should be ready until the rendezvous for analyzing observation data. This study is categorized into fields of computer graphics and big data analysis in computer science. This study develop image and database browser. This study has developed two sub systems. One is thermal image viewer. Another is thermal image database for calibration. Thermal calibrations exist 2 ways that using calibration curve and using interpolation based on near parameters by calibration database. Although thermal image viewer exists such as ParaView [3], those viewers don't have calibration system. The former way uses calibration formula such as Arai (2015) [4]. The way converts easily digital number to temperature. On the other hands, lacking precision of the way depends on a calibration formula, because the way based on an approximation. The latter way uses same method such as big data analysis. The way finds matching data or near parameters data from a large amount of data. The way needs a database function. That is thought able to calibrate precisely, but the way requires high calculation costs. The way is a key to develop new type of viewer. Therefore, this study has development of a system of involving viewer and a database for calibration. The system is developed from scratch. Goal of this study is development of software that visualizing TIR exploration data and getting TIR ground test data for calibration. TIR data consists of TIR image and ancillary data. The ancillary data has target information, optical information and environment information.

2

Requirements: Required functions were decided based on hearing with Hayabusa2 TIR science team. The requirements were divided into 4 items.

- Loading TIR data
- Displaying TIR image and 3D model
- Getting TIR data for a calibration
- Database for ground test of TIR

3

Development Environments: The environments can develop by open source.

4

System Design: The system has 6 modules. Those modules are built into 4 components.

Components

- User Interface
- Processing

- Database
- Converting

Modules

- Loading TIR data
- Displaying TIR image
- Converting
- Database browser
- Displaying Visualization Toolkit file
- Display 3D model.

5

Calibration database: Calibration database stores TIR data. The database consists thermal image table and pixel information table. This data is obtained by ground test of TIR in JAXA. This study refers to Kuwano (2016) about pixel information table [5].

6

Results: This study considered Trade-off and User feedback.

7

Demonstration: We have a demonstration of this system in this presentation.

8

Discussion: It is developed in this study that the system suitable for analyze. The system should be improved on.

9

Conclusions: This study has developed the system. The system displays TIR image and ancillary data. This system satisfies all requirements.

10

References:

[1] JAXA, website

http://www.jaxa.jp/press/2015/12/20151214_hayabusa2_j.html (In Japanese)

[2] T. Okada, et al., THERMAL-INFRARED IMAGER TIR ON HAYABUSA2 FOR OBSERVATION OF ASTEROID (162173) 1999JU3.46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015.

[3] ParaView, website <http://www.paraview.org>

[4] T. Arai, et al., Thermal Imaging performance of TIR onboard Hayabuse2 Spacecraft, 2015.

[5] S. Kuwano. Image database with query by individual pixel attribute for Hayabusa2 TIR archive, Master's thesis, University of AIZU, Feb 2016.

キーワード：はやぶさ2、データベース、中間赤外カメラ

Keywords: Hayabuse2, Database, TIR

「はやぶさ」試料キュレーションの現状と「はやぶさ2」試料受入設備の開発状況

Curation works for the Hayabusa samples and development for Hayabusa2 sample curation facility

*矢田 達¹、安部 正真¹、岡田 達明¹、垓本 尚義³、上梶 真之¹、唐牛 譲¹、中藤 亜衣子¹、橋口 未奈子¹、松本 徹¹、西村 征洋²、熊谷 和也¹、松井 重雄¹、藤本 正樹¹

*Toru Yada¹, Masanao Abe¹, Tatsuaki Okada¹, Hisayoshi Yurimoto³, Masayuki Uesugi¹, Yuzuru Karouji¹, Aiko Nakato¹, Minako Hashiguchi¹, Toru Matsumoto¹, Masahiro Nishimura², Kazuya Kumagai¹, Shigeo Matsui¹, Masaki Fujimoto¹

1.宇宙航空研究開発機構、2.マリン・ワーク・ジャパン、3.北海道大学

1.Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Marine Works Japan, 3.Hokkaido University

小惑星探査機「はやぶさ」は、2010年にS型小惑星イトカワより表層レゴリス試料を地球に帰還させた[1,2]。その後の初期分析により、イトカワ粒子は平衡LLコンドライト隕石と類似している事が判明している[3]。2012年度から更なる詳細研究のために2013年度までに2回の国際公募研究が行われ、計32の研究テーマが採択され、延べ112個の粒子が配布された[4]。その成果として、1回目のタッチダウン地点の粒子の方が表面の宇宙風化層の成長が小さかったこと[5]、イトカワ粒子の⁴⁰Ar-³⁹Ar年代が13億年と求められ、現在のイトカワの前駆天体を破壊する大規模衝突前若しくはその最中の年代を示すと考えられること[6]、などが新たに分かってきた。これを受けて、2015年度には、第3回の国際公募研究を実施した。6月に計12のテーマが採択され、8月より配布を開始し、2016年1月までに11テーマ44個の配布を終了した。2016年度より国際公募研究は随時受け付け形式で実施する予定で準備を進めている。

また、前述の「はやぶさ」のキュレーション作業と並行して、2014年12月に打ち上げられた「はやぶさ2」による帰還試料の受入設備の仕様検討を、主にJAXA外の研究者から構成される仕様検討委員会の下、進めてきた[7]。「はやぶさ2」は2018年にC型小惑星Ryuguに到達し1年半に渡って遠隔探査、クレーター形成実験及び3回の試料採集を行い、2020年12月に採集した試料を地球に帰還させる予定である[8]。仕様検討委員会で、2018年度から機器・装置の機能確認及び帰還試料受け入れリハーサルを開始出来るように、現有施設におけるクリーンルームの増設、専用のクリーンチェンバーの製作を行う為、その性能・機能について、議論が行われている。現在の所、真空中で試料の一部を分取・保管することが出来るような機能を持たせることが検討されている。早ければ2016年度中には「はやぶさ2」にむけた設備改修が開始する予定で検討を進めている。

References: [1] Abe M. et al. (2011) *LPSC XXXVII*, #1638, [2] Yada T. et al. (2014) *Meteoritics Planet. Sci.* 49, 135, [3] Nakamura T. et al. (2011) *Science* 333, 1113. [4] Yada T. et al. (2014) *LPSC XXXV*, #1759, [5] Noguchi T. et al. (2014) *Earth Planets Space* 66, 124, [6] Park J. et al. (2015) *Meteoritics Planet. Sci.* 50, 2087, [7] Uesugi M. et al. (2015), *Hayabusa 2015 symposium*, [8] Tsuda Y. et al. (2013) *Acta Astronautica* 91, 356.

キーワード：はやぶさ2、サンプルリターンミッション、キュレーション、イトカワ、リュウグウ、はやぶさ

Keywords: Hayabusa2, Sample return mission, curation, Itokawa, Ryugu, Hayabusa

はやぶさ2 着陸地点の検討状況

Current Status of Hayabusa2 Landing Site Deliberation

*中藤 亜衣子¹、藪田 ひかる²、小松 睦美³、諸田 智克⁴、松岡 萌⁵、杉田 精司⁶、廣井 孝弘⁷、北里 宏平⁸、岡田 達明¹、千秋 博紀⁹、佐々木 晶²、中村 智樹⁴、小林 直樹¹、渡邊 誠一郎⁵、はやぶさ2 着陸地点検討ワーキンググループ

*Aiko Nakato¹, Hikaru Yabuta², Mutsumi Komatsu³, Tomokatsu Morota⁴, Moe Matsuoka⁵, Seiji Sugita⁶, Takaaki Hiroi⁷, Kohei Kitazato⁸, Tatsuaki Okada¹, Hiroki Senshu⁹, Sho Sasaki², Tomoki Nakamura⁴, Naoki Kobayashi¹, Seiichiro Watanabe⁵, Hayabusa2 Landing Site Working Group

1.宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所、2.大阪大学、3.総合研究大学院大学、4.名古屋大学、5.東北大学、6.東京大学、7.ブラウン大学、8.会津大学、9.千葉工業大学

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Osaka University, 3.The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI], 4.Nagoya University, 5.Tohoku University, 6.The University of Tokyo, 7.Brown University, 8.University of Aizu, 9.Chiba Institute of Technology

2014年12月に打ち上げに成功した「はやぶさ2」は、2018年7月にC型小惑星162173 Ryuguへ到着する予定である。Ryuguでは18ヶ月間滞在し、試料採取を目的とした3回のタッチダウン(TD)が行われる(Yoshikawa et al., 2014)。「はやぶさ2」ミッションの科学的成果を最大化するためには、搭載機器であるONC, NIRS3, TIR, LIDAR, MASCOTから得られる小惑星観測のリモートセンシングデータと、隕石試料や模擬試料を用いた地上分析データの両者を統合し、最先端の科学的知見からTD地点を選定することが重要である。そのため、「はやぶさ2」のサイエンスの全体像を構築する統合サイエンスチーム(Kobayashi et al., 2014)は、2014年6月にTD地点選定の指標となる5つ(隕石タイプ・水質変成度・宇宙風化度・揮発性物質質量・粒子サイズ)のワーキンググループ(WG)を組織した。このWGは、観測と分析が融合することにより最適なTD地点を選定し、また両者を横断した新しい研究テーマへと惑星科学の裾野を広げることを目的としている。本発表では、これまでの各WGの検討状況を報告する。

隕石タイプWG: Ryugu全球の隕石タイプを速やかに判別することを第一の目標とし、さらに、局所的な不均一性の有無に着目し、C型小惑星の不均一性についても議論を進めている。過去の隕石研究により、多くの炭素質隕石は、mm-cmスケールでの不均一性を持つことが示されているが、それ以上のスケールでの状態は不明である。「はやぶさ2」で得られるm(メートル)スケールでの小惑星表層状態を正しく評価するため、隕石タイプ間、及び隕石タイプ内バリエーションの基礎データ構築を図る。小惑星表層の物質分布から小惑星形成過程の議論へと発展させるには、角礫岩化・変成・宇宙風化作用を考慮する必要があり、随時他のWGとの合同会議を開催することで検討を進めている。

水質変成度・宇宙風化度WG: Ryuguで採取したい「魅力的な物質」について議論し、(1) Ryuguを代表するような試料、(2)始原的な試料、(3)その他、の3種類が挙げられた。まず(2)に的を絞り、「リモセンデータを用いてどのように判別できるか」について現在の知見から具体的な検討を行った。本WGでは「始原的」=「水質変成、熱変成、宇宙風化をあまり経験しておらず、非平衡アモルファスシリケートが存在する状態」を想定した。この場合、予想されるスペクトルは、低アルベド・特定の含水鉱物の存在を示唆する $0.7\mu\text{m}$ は無しor弱い・含水層に起因する $3\mu\text{m}$ 付近の吸収は有り・無水珪酸塩鉱物に起因する吸収は無しor弱い、と考えられる。一方で、スペクトル形状は熱変成や宇宙風化など複数のパラメータが関与しているため、物質科学的研究がなされている隕石等の分光分析データのさらなる蓄積が必要であるという問題提起がなされた。今後は(1)(3)についても同様に思考実験を行う。

揮発性物質WG: 小惑星表面での有機物の探索ははやぶさ2の主要な科学目標の1つであり、小惑星の始原性を推定するために有機物含有量の観測が期待される。例えば、先行研究により、CM, CR, Tagish Lake隕石の反射スペクトルにおける波長 $0.55\mu\text{m}$ のアルベドと不溶性有機物含有量との間、波長 $0.39\mu\text{m}$ と全炭素含有量との間(Hiroi et al., 2016)、に相関が見られ、水質変成度の判別にも有効であることがわかっている。水質変成を受けた隕石グループほど炭素量が“見かけ上”多い傾向にあるが、始原性のパラメータとしては不溶性/可溶性有機

物の量比を用いる評価法がより適切であると提案する。一方で、熱変成や宇宙風化を判別する観測指標データはまだ確立されていないため、地上実験での更なる検証が必要である。

粒子サイズWG: 現状想定される表面状態決定法を整理した。特に、反射率の位相角依存性と表面状態の関係性と、LIDAR受光強度を用いた表面ラフネスの推定可能性についての情報共有を行っている。今後、複数機器を統合した表面状態推定法の検討を続けていく。加えて、他WGと協力しスペクトル形状に与える影響の評価を進める。

いずれのWGも、まずは観測と分析の意識共有、TD選定への科学的知見提供、そして新しいサイエンステーマの創出へと歩みを進めている段階である。観測データの解釈には、隕石等の地上分析データが必要不可欠であり、「はやぶさ2」帰還後の回収試料の採取・分析にはRyuguでの観測データが非常に有用である。今後もWGの活動を継続し、「はやぶさ2」ミッション成功と惑星科学の発展へつなげたい。

キーワード：はやぶさ2、統合サイエンス、着陸地点

Keywords: Hayabusa2, Interdisciplinary Science Team, landing site

地球スイングバイ時の「はやぶさ2」可視カメラが捉えた月・地球

Earth-moon images captured by Hayabusa2 visible cameras during Earth swing-by

*杉田 精司¹、山田 学²、澤田 弘崇³、諸田 智克⁴、本田 理恵⁵、亀田 真吾⁶、本田 親寿⁷、鈴木 秀彦⁸、神山 徹⁹、小川 和律¹⁰、石黒 正晃¹¹

*Seiji Sugita¹, Manabu Yamada², Hirotaka Sawada³, Tomokatsu Morota⁴, Rie Honda⁵, Shingo Kameda⁶, Chikatoshi Honda⁷, Hidehiko Suzuki⁸, Toru Kouyama⁹, Kazunori Ogawa¹⁰, MASATERU ISHIGURO¹¹

1.東京大学、2.千葉工業大学、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4.名古屋大学、5.高知大学、6.立教大学、7.会津大学、8.明治大学、9.産総研、10.神戸大学、11.ソウル大学

1.the University of Tokyo, 2.Chiba Institute of Technology, 3.JAXA, 4.Nagoya University, 5.Kochi University, 6.Rikkyo University, 7.Aizu University, 8.Meiji University, 9.AIST, 10.Kobe University, 11.Seoul National University

はやぶさ2探査機は2015年12月3日に地球スイングバイを行った。我々はこの機会に、はやぶさ2の可視カメラ（ONC-T, W1, W2）を用いて、地球と月を撮像した。得られた画像は、小惑星リュウグウに到着する前に撮像できる最後の面光源画像であるため、本カメラの性能評価をする上で非常に貴重な機上データとなる。本発表では、今回の地球スイングバイ前後の地球・月撮像の結果と予備的な解析結果を紹介する。

小惑星イトカワにおける自転周期が傾斜に与える影響

The Effect of Rotation Period on Slope Distribution on Asteroid Itokawa

*金丸 仁明¹、佐々木 晶¹*Masanori Kanamaru¹, Sho Sasaki¹

1.大阪大学

1.Osaka University

小惑星イトカワのような不規則な形状をもつ小天体では、自転による遠心力は表面重力場に大きな影響を与えている。太陽光圧によって小惑星の自転周期が変化することでもわかってきており（YORP効果）、小惑星の集積過程や表面地形の形成を数十万年の期間で考える際には重要な要素である。

本研究では、Werner and Scheeres (1997) で提案された密度一定の多面体の重力場を計算する手法を使って、イトカワ表面における重力ポテンシャル、重力加速度、傾斜度などを計算した。傾斜度は表面の方線ベクトルとその地点での重力加速度ベクトルとのなす角で定義でき、重力場と地形の相関を考える際の指標となる。今回は、はやぶさミッションにより得られたイトカワの3次元形状モデル (Gaskell et al. 2006) とバルク密度として1.95 g/cm³ (Abe et al. 2006) という値を用いた。自転周期を4時間、6.5時間、9時間、12.1324時間（観測値、Fujiwara et al. 2006）、18時間、24時間と変えて計算し、それぞれで傾斜度のヒストグラムを作成した。加えて、地域による傾斜分布のちがいを調べるため、イトカワのくびれ地域（150°<x<250°）に絞ってヒストグラムを作成した。

自転周期が短い場合ほど、傾斜の大きな領域が減少する傾向が見られた。自転周期が6.5時間のときに傾斜の大きな領域が最も少なくなったが、自転周期を4時間まで縮めると、逆に急傾斜な地域は増える結果となった。地域別に見ると、イトカワのくびれ地域に急傾斜な領域が集中していた。イトカワ全体を見ると、10度前後の傾斜をもつ領域が最も多いが、くびれ地域では、20度から30度の傾斜をもつ領域が最も多く、それ以上の急傾斜も多く見られた。

くびれ地域に見られる急傾斜な領域は、重力的に不安定であるとも考えられる。傾斜をローカルな重力場と地形とのミスマッチの指標とするならば、自転周期を早めることである程度緩和できることがわかった。イトカワの自転周期が今よりも短かった時代に当時の重力場を反映した地形が形成され、YORP効果によって自転周期が長くなった現在でも保存されていると解釈することができる。ただし、4時間という自転周期は小惑星が形状を保つ限界であり、遠心力が重力加速度を上回る地域が出てくるものと考えられる。

キーワード：小惑星25143イトカワ、重力場、傾斜、YORP効果

Keywords: Asteroid 25143 Itokawa, Gravity field, Slope, YORP effect

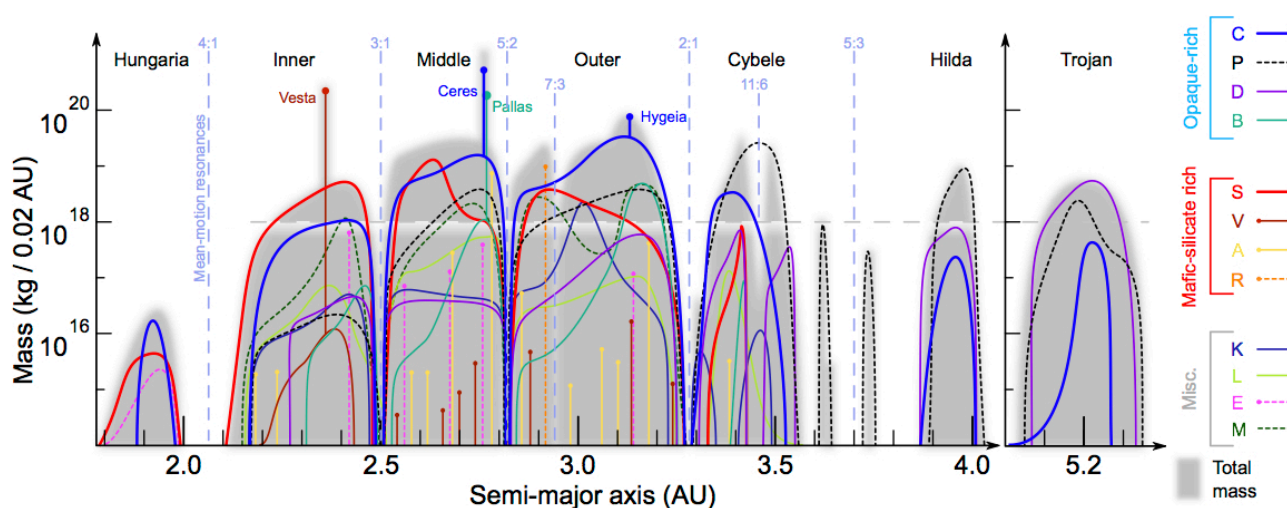
Asteroids as Records of Solar System History

*Francesca Eleanora DeMeo¹, Benoit Carry², David Polishook³, Brian Burt¹, Richard Binzel¹, Nicholas Moskovitz⁴

1.Massachusetts Institute of Technology, 2.Observatoire de la Cote d'Azur, 3.The Weizmann Institute, 4.Lowell Observatory

Asteroids and other small bodies are markers, like tiny beacons, relaying information about the initial temperature and composition conditions of our Solar System revealed by their surface compositions. The Solar System's evolution may also be determined from the scattering record of these bodies. Today we are armed with major advancements from the past decade that have revolutionized the field of asteroids in areas such as discovery, physical characterization, meteorite links, and dynamical models. Based on tens of thousands of measurements from the Sloan Digital Sky Survey, in this talk I present a new compositional map of the asteroid belt that reveals a greater diversity of asteroids as a function of size and distance and discuss these results in the context of Solar System formation and evolution.

Keywords: asteroid, composition, solar sytem



水素ガス圧による含水小惑星中の流体の流れ

Fluid flow in hydrous asteroids induced by H_2 gas pressure*藤谷 渉¹*Wataru Fujiya¹

1.茨城大学 理学部

1.Ibaraki University, College of Science

Physicochemical models on thermal history associated with material evolution of hydrous asteroids have been explored by many authors (e.g., Grimm and McSween 1989; Cohen and Coker 2000). A few models included fluid flow in these bodies to reproduce the characteristic oxygen isotopic compositions of aqueously altered meteorites like CM and CI chondrites (e.g., Young 2001; Palguta et al. 2010). These fluid flow models predicted convective or exhalation flow induced by temperature gradient or vapor pressure. Although these models involved hydration reactions, gas phases such as H_2 produced by the reactions were not taken into account.

Here I present a model on fluid flow in hydrous asteroids considering H_2 gas generated by oxidation of metallic iron. Since H_2 gas pressure in hydrous asteroids is inferred to be hundreds of bars from the amount of metallic iron in primitive chondrites, steep pressure gradient occurs between the surface and interior of the asteroids. The model is 1D spherically symmetric and includes thermal conduction of heat generated by ^{26}Al decay, phase transition of water/ice, a simplified aqueous alteration reaction, and fluid flow. I assume that the asteroids accreted 2.7 Myr after CAI formation, resulting in the initial $^{26}Al/^{27}Al$ ratio of 3.7×10^{-6} . The velocity of fluid flow is derived from the Darcy's law. The radii of the asteroids range from 30-100 km. The initial temperature is 173 K, and the surface temperature is fixed to this value. The asteroids initially consist of 70 vol% rock, 5 % water/ice, and 25 % void space. When liquid water is present, the rock reacts with water and 90 % of the consumed water is assumed to convert to H_2 gas until metallic iron is completely oxidized.

The results of the simulation suggest that fluid (H_2 gas and liquid water) flows outward soon after ice melts and water reacts with rock. However, water stops flowing ~8 km below the surface because temperatures there are lower than the freezing point of water. Then an icy shell forms near the surface, and liquid water accumulates just below the icy shell. As a result, water heterogeneously distributes throughout the asteroids in spite of its initially homogeneous distribution. Water consumed by the alteration reaction amounts to ~1.7-3.1 vol% around the center of the asteroids and to 5.5-16 % below the icy shell, depending on the asteroid sizes. The peak temperatures range from ~800 K around the center to ~370 K in heavily altered regions. These combinations between peak temperatures and alteration degrees are consistent with those inferred for CO and CM chondrites. This may imply that CO and CM chondrites originated from the same parent body, suggested from their oxygen isotopic compositions forming a single regression line in an oxygen three-isotope plot.

キーワード：流体の流れ、含水小惑星、水素ガス

Keywords: fluid flow, hydrous asteroids, hydrogen gas

粉粒体天体構成粒子の圧縮特性に関する実験的研究

Experimental study on compression property of granular material

*大村 知美¹、中村 昭子¹*Tomomi Omura¹, Akiko Nakamura¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

微惑星や再集積天体、彗星といった、粉粒体より構成される天体は普遍的であるといえる。天体内部の空隙率構造は強度、熱的性質に影響するため、衝突進化や熱進化に影響する重要な要素である。この空隙率は自己重力、岩塊の存在、衝突、振動、熱進化によって変化する。この中でも自己重力による空隙率構造は全てに先立つ要素であり、他の要素の影響を見積もるためには、自己重力によって、深さにより土圧が異なることで生じる空隙率分布を評価することが必要である。土圧の差による空隙率分布を見積もるためには天体構成粒子の圧縮特性の理解が不可欠である。圧縮特性に影響する要素としては粉粒体層の初期空隙率、粉粒体層構成粒子の組成、粒子径、粒子径分布幅、粒子形状が考えられるが、これらの特性は各天体で様々である。さらに、真空中では粉粒体層構成粒子の表面エネルギーは100倍程度大きくなると考えられている(Kimura et al., 2015)。表面エネルギーは粒子間力に影響する要素であり、圧縮特性にも影響すると考えられる。そのため、様々な環境下にある構成粒子に適用可能な一般則を構築する必要がある。

初期空隙率については、Kiuchi and Nakamura (2014)において、重力によって堆積した均一粒径より成る粉粒体層の空隙率は粒子間力と重力の比より表せるとした経験式が導かれている。ただしこれはあくまでも天体表面にのみ適用可能であり、ある深さよりも下の粉粒体層は土圧による圧縮を受けていると考えられる。

また、粉粒体層の圧縮過程において、粉粒体層の空隙率は始め構成粒子の再配置によって減少するが、この再配置メカニズムは構成粒子の配位数によって異なる。粒子の配位数が6以下の場合、粒子は主に転がりによって再配置される。しかし、粒子の配位数が6を超えると粒子はすべりを伴って再配置されるようになる。配位数は空隙率の減少と共に増加し、配位数が6に達するのは空隙率が0.7のときである(Wada et al., 2011)。

我々はこれまでに、様々な組成、粒子径、粒子径分布幅を持った試料で圧縮実験を行ってきた。試料の主成分は Al_2O_3 と SiO_2 、試料の粒子径は100 μm 以下のものを用いた。これらの試料を容器にふるい入れゆるみ充填し、圧縮試験機による圧縮実験を行った。圧力範囲は 10^4 - 2×10^6 Paである。

圧縮前試料の空隙率は0.54-0.86と試料により異なった。この結果とKiuchi and Nakamura (2014)で提案された経験式より得られる値を比較すると、粒子径分布幅を持つ粉粒体についても粒子径としてメジアン径を用いることでこの式はおおむね適用可能であることが分かった。また、 10^4 - 2×10^6 Paの圧力範囲において試料の空隙率は ~ 0.7 以下であったが、このとき試料構成粒子の持つすべり摩擦力が大きいほど、粉粒体層の圧縮曲線の傾きが小さくなる傾向が分かった。さらに、試料構成粒子の粒子径分布幅も圧縮特性に大きく影響しており、粒子径分布幅の大きい試料はより圧縮されやすいということが分かっている(Omura et al., ISTS, 2015)。

我々はさらに圧縮を行う圧力範囲を 10^2 Pa以下まで広げた実験を行った。すると粉粒体層の圧縮過程は次のような領域に分けられることがわかった。(1)圧力が粉粒体層の強度を下回っており、粉粒体層は圧縮されない領域。(2)圧縮は起こるが、空隙率の減少が緩やかである領域。(3)(2)の領域に比べ、空隙率の減少が急であるような領域。これらの領域を分ける原因についてさらなる調査と考察を行い、結果を報告する。

キーワード：小天体、空隙率、内部構造、粉粒体

Keywords: Small body, Porosity, Internal structure, Granular material

Thermal Modeling of Comet-Like Asteroids

Thermal Modeling of Comet-Like Asteroids

*Park Bach Yoonsoo^{1,2}, ISHIGURO MASATERU¹, Usui Fumihiko³

*Yoonsoo Bach Park^{1,2}, MASATERU ISHIGURO¹, Fumihiko Usui³

1.Seoul National University, 2.Korea Advanced Institute of Science and Technology, 3.The University of Tokyo

1.Seoul National University, 2.Korea Advanced Institute of Science and Technology, 3.The University of Tokyo

Recent analysis on asteroidal thermophysical property revealed that there is a tendency that their thermal inertia decrease with their sizes at least for main belt asteroids. However, little is known about the thermal properties of comet-like bodies. In this work we utilized a simple thermophysical model to calculate the thermal inertia of a bare nucleus of comet P/2006 HR30 (Siding Spring) and an asteroid in comet-like orbit 4015 Wilson-Harrington from AKARI observation data. It is also shown that the determination of their thermal inertia is very sensitive to their spin vector, while the diameter is rather easy to be constrained to a certain range by combining multi-wavelength observational data. Thus, we set diameter and hence the geometric albedo as fixed parameters, and inferred the spin vector and thermal inertia of the targets. Further detailed analyses on these cometary bodies will shed light on our understanding of the detailed surfacial characteristics of them.

キーワード : Thermal model、Asteroids、Thermophysical model

Keywords: Thermal model, Asteroids, Thermophysical model

MONITORING OBSERVATIONS OF THE JUPITER-FAMILY COMET 17P/HOLMES DURING ITS 2014 PERIHELION PASSAGE

*Yuna Grace Kwon¹, MASATERU ISHIGURO¹, Hidekazu Hanayama², Daisuke Kuroda³, Satoshi Honda⁴, Jun Takahashi⁴, Yoonyoung Kim¹, Myung Gyoon Lee¹, Young-Jun Choi⁵, Myung-Jin Kim⁵, Jeremie Vaubaillon⁶, Takeshi Miyaji², Kenshi Yanagisawa³, Michitoshi Yoshida⁷, Kouji Ohta⁸, Nobuyuki Kawai⁹, Hideo Fukushima¹⁰, Jun-ichi Watanabe¹⁰

1.Seoul National University, 2.Ishigakijima Astronomical Observatory, 3.Okayama Astrophysical Observatory, 4.Nishi-Harima Astronomical Observatory, 5.Korea Astronomy and Space Science Institute, 6.Observatoire de Paris, 7.Hiroshima University, 8.Kyoto University, 9.Tokyo Institute of Technology Meguro, 10.National Astronomical Observatory of Japan

Comets are the most pristine reservoir of the materials left over from the formation epoch of the solar system. When they are heated and expel this ancient material in their orbital motions around the Sun, we can have the opportunity to decipher the primitive information which have buried underneath the cometary surface for a long time. Herein, we present a brief overview of our observational results of a Jupiter-Family comet, 17P/Holmes, which underwent the historic outburst in 2007, to investigate its secular change in activity during 2014 perihelion passage. We performed the monitoring observation over two years, welcoming its first perihelion passage since the 2007 outburst. We analyzed the imaging data taken over two years, and found that there is a strong asymmetry of cometary activity with respect to the perihelion. Compared to the values taken right after the 2007 outburst, our results present a dust-production rate that has been utterly quenched by about five orders of magnitudes and is rather similar to that of pre-outburst inactive phase. We also found that the secular evolution of the fractional active area over the cometary surface had drastically dropped by about two orders of magnitudes in only one orbital revolution around the Sun. All of our results indicate that 17P/Holmes has entered upon an inactive phase far more rapidly than the prediction of the previous researches, and from this we conjecture that a surficial dust layer (~7 -10 cm in depth) of the comet play a dominant role as an insulator of sublimation of subsurface water ice from the solar irradiation.

Keywords: comets, 17P/Holmes

DESTINY+: 深宇宙探査技術実証機

DESTINY+: A Technology Demonstrator for Deep Space Exploration

*川勝 康弘¹、荒井 朋子²、岩田 隆浩¹、岡田 達明¹、船瀬 龍³

*Yasuhiro Kawakatsu¹, Tomoko Arai², Takahiro Iwata¹, Tatsuaki Okada¹, Ryu Funase³

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.東京大学

1.ISAS, JAXA, 2.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 3.The University of Tokyo

DESTINY+, which stands for "Demonstration and Experiment of Space Technology for INTERplanetary voYage," is a mission candidate for the next space science small program.

DESTINY+ is a high performance deep space transportation system whose maximum delta-v capacity is 5km/s, and maximum payload mass is 200kg. DESTINY is based on the previously developed small scientific standard satellite bus system, and extended by five novel technologies. The key technologies to realize DESTINY+ are, the large scale ion engine, the ultra-light weight solar panel, advanced thermal control devices, novel mission & orbit design, and small & high specification newly developed bus components.

DESTINY+ also demonstrate multiple fly-by explorations of near earth objects (NEO) by using instruments on DESTINY+ mother ship and its daughter probe "PROCYON mini". The first target NEO is one of the most unusual comet-asteroid transition bodies, 3200 Phaethon, which has dust tails. In this paper, we present the outline of mission plan, the system design, and key technologies of DESTINY+.

キーワード: DESTINY+、PROCYON-mini、Phaethon

Keywords: DESTINY+, PROCYON-mini, Phaethon

DESTINY+：小型科学衛星による小惑星Phaethonフライバイミッション

DESTINY+：Phaethon flyby with reUSable probe

*荒井 朋子¹、小林 正規¹、千秋 博紀¹、和田 浩二¹、石橋 高¹、春日 敏測¹、山田 学¹、亀田 真吾¹³、大塚 勝仁³、渡部 潤一²、伊藤 孝士²、川勝 康弘⁴、Sarli Bruno⁴、岩田 隆浩⁴、岡田 達明⁴、吉川 真⁴、中村 智樹⁶、藪田 ひかる⁵、佐々木 晶⁵、小松 睦美⁷、中藤 亜衣子⁴、廣井 孝弘⁸、三河内 岳⁹、浦川 聖太郎¹⁰、阿部 新助¹¹、石黒 正晃¹²、木村 宏¹⁴、橘 省吾¹⁵、中村 良介¹⁶、中村メッセンジャー 圭子¹⁷、佐藤 幹哉²⁰、Srama Ralf¹⁸、Kruger Harald¹⁹

*Tomoko Arai¹, Masanori Kobayashi¹, Hiroki Senshu¹, Koji Wada¹, Ko Ishibashi¹, Toshihiro Kasuga¹, Manabu Yamada¹, Shingo Kameda¹³, Katsuhito Ohtsuka³, Jun-ichi Watanabe², Takashi Ito², Yasuhiro Kawakatsu⁴, Sarli Bruno⁴, Takahiro Iwata⁴, Tatsuaki Okada⁴, Makoto Yoshikawa⁴, Tomoki Nakamura⁶, Hikaru Yabuta⁵, Sho Sasaki⁵, Mutsumi Komatsu⁷, Aiko Nakato⁴, Takahiro Hiroi⁸, Takashi Mikouchi⁹, Seitaro Urakawa¹⁰, Shinsuke Abe¹¹, MASATERU ISHIGURO¹², Hiroshi Kimura¹⁴, Shogo Tachibana¹⁵, Ryosuke Nakamura¹⁶, Keiko Nakamura-Messenger¹⁷, Mikiya Sato²⁰, Ralf Srama¹⁸, Harald Kruger¹⁹

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.国立天文台、3.東京流星観測網、4.宇宙航空研究開発機構、5.大阪大学、6.東北大学、7.総合研究大学院大学、8.ブラウン大学、9.東京大学、10.日本スペースガード協会、11.日本大学、12.ソウル大学、13.立教大学、14.神戸大学、15.北海道大学、16.産業技術総合研究所、17.NASAジョンソンスペースセンター、18.シュトゥットガルト大学、19.マックス・プランク研究所、20.かわさき宙と緑の科学館

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.National Astronomical Observatory of Japan, 3.Tokyo Meteor Network, 4.JAXA, 5.Osaka University, 6.Tohoku University, 7.Sokendai, 8.Brown University, 9.The University of Tokyo, 10.Japan Spaceguard Association, 11.Nihon University, 12.Seoul National University, 13.Rikkyo University, 14.Kobe University, 15.Hokkaido University, 16.AIST, 17.NASA Johnson Space Center, 18.University of Stuttgart, 19.Max Planck Institutes, 20.Kawasaki Municipal Science Museum

深宇宙探査技術実証機DESTINY+ミッションでは、親機のDESTINY+および親機から放出される子衛星

(PROCYON-mini)により、小惑星(3200)Phaethonのフライバイ探査および関連天体へのマルチフライバイ探査を計画している。小惑星Phaethon(公転周期1.4年)は、ふたご座流星群母天体であり、近日点(0.14AU)でのみ彗星活動が報告されている彗星—小惑星遷移天体である。地上観測から明らかになった、ふたご座流星群の発光輝線スペクトルが示すナトリウム枯渇から、母天体であるPhaethonの局所的加熱溶融も示唆されている。したがって、Phaethonには局所的加熱溶融を経た物質と彗星的物質が混在する可能性があり、彗星の物質不均質と太陽系固体物質の熱進化解明の鍵となる探査標的ある。また、2005UDおよび1999YCという分裂天体を持つとともに、メインベルト小惑星(2) Pallasからの分裂天体である可能性もあり、太陽系外縁部から内側への物質移動仮説を実証する天体でもある。さらに流星群は地球の公転軌道と交差するため、流星群の流星体は定期的な地球へ物質供給源であり、地球生命の起源と関連する可能性も高い。直径5.1kmと地球接近天体の中でも最大級で、スペースガードの観点から監視と理解が必要である。本稿では、DESTINY+による小惑星Phaethonへのフライバイミッションの計画内容と科学的意義について述べる。

キーワード：小惑星フェイトン、流星群、流星群母天体、始原天体、デスティニープラス、プロキオンミニ

Keywords: Asteroid (3200) Phaethon, Meteor Showers, Meteor shower parent bodies, Primitive bodies, DESTINY+, PROCYON-mini

地球軌道周辺領域におけるダスト分布のサイズ依存性

Size Dependence of Dust Distribution around the Earth Orbit

*植田 高啓¹、小林 浩²、竹内 拓*Takahiro Ueda¹, Hiroshi Kobayashi², Taku Takeuchi

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.名古屋大学大学院理学研究科

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Physics, Nagoya University

In our solar system, there are many interplanetary dust particles (IDPs) originating mainly from asteroid collisions and activity of comets. These particles gradually decrease its angular momentum and drift radially due to the absorption and re-radiation of the sunlight (Poynting-Robertson effect; e.g. Burns et al. 1979). Investigating the properties of the zodiacal dust particles may reveal the properties of parent bodies and the creation process of them.

We analyzed the thermal emission from the IDPs called as the zodiacal light observed via all sky survey by the first Japanese infrared astronomical satellite, AKARI. We found that the observed surface brightness in the trailing direction of the Earth orbit is greater than that in the leading direction by 3.7% in band at 9 μ m and 3.0% in band at 18 μ m. This result is consistent with previous observations with IRAS (Dermott et al. 1994). This asymmetry is thought to come from the asymmetric dust distribution made by the IDPs trapped by MMRs of Earth orbit.

In order to reveal dust properties resulting in the asymmetry of dust distribution, we numerically integrated dust orbits in the Solar system including radiation from the Sun. The orbital evolution can be characterized by the parameter β which represents the strength of the radiation force compared to the gravitational force from the Sun. The parameter β can be defined as a function of dust properties such as dust radius s and material density ρ . In our calculations, particles are set to be 0.001-0.1 in β (corresponding to 3-300 μ m in radius with $\rho = 2$ g/cc) and their initial orbits are determined according to the origins of main-belt asteroids, Jupiter-family comets and Encke-type comets.

We found that larger particles are easier to be trapped by MMRs and make high density region in the dust distribution. However, larger particles are easier to be trapped by outer resonances which hardly contribute to the asymmetry in the surface brightness. In consequence, asteroidal grains of radius 30 μ m are most likely to make the asymmetry in the surface brightness. For cometary grains, due to the high eccentricity, particles are difficult to be trapped by resonance and less likely to make the asymmetry compared to the asteroidal grains.

In this presentation, we show the results of analysis of AKARI observations and orbital calculations and discuss the origin and typical size of the IDPs.

キーワード：惑星間塵、地球

Keywords: Interplanetary dust particles, Earth

Dynamical evolution of dust particles: from comets to the inner solar system

*Hongu Yang¹, MASATERU ISHIGURO¹

1.Department of Physics and Astronomy Seoul National University ROK

There have been a long-standing debate regarding origins of interplanetary dust particles. Recent research about the optical properties and spatial distribution of zodiacal light suggested that ~ 90% of interplanetary dust particles which comprise the zodiacal light would be originated from comets. In this work, we started from different point of view. We studied the final status of dust cloud made by the dust particles ejected from comets. We chose representative comets which cover a wide variety of cometary orbital distribution. Hypothetical dust particles with different sizes were ejected from selected actual comets, following a dust ejection model based on cometary observations. We performed a numerical integration of dust orbits involving photon drag from solar radiation and perturbations from planetary gravitation. In this presentation, we will introduce our results about final positions of the cometary dust particles, and compare it with the observed quantities of interplanetary dust particles in the inner solar system, that is, the mass budget, size-frequency distribution, orbital elements distribution and zodiacal light brightness distribution.

Keywords: interplanetary dust particles, comets, zodiacal cloud, numerical simulation

MMX計画

The MMX mission

*藤本 正樹¹*Masaki Fujimoto¹

1. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Martian Moons eXplorer (MMX) is the mission studied intensively by JAXA with the planned launch in 2022. It will explore the two moons of Mars, namely, Phobos and Deimos, and return samples from Phobos. The sampling will be done after detailed inspection of the moon from quasi-orbits around it is performed, while less detailed remote-sensing is planned for Deimos. The main objective of MMX is to understand the origin of the two Martian moons that remains controversial, with its goal being to reveal how small bodies at the outer-edge of the rocky-planet region behaved upon formation of the solar system. Mars is located at the outer-edge of the rocky-planet region, or at the gateway position to the snow line that demarcates the inner- and the outer-solar system. It is from beyond the snow line that water and volatiles were transported to the rocky planets. Without the across-the-snow-line transport, habitability is not an option for a rocky planet that was born dry inside the snow line. Small bodies, like those we find as primordial asteroids today, must have been the capsule for the transport, and thus, understanding the behavior of small bodies around the snow line during the formation of the solar system is one of the goals of planetary science as well as of MMX. In this talk, the mission scenario of MMX will be introduced and also discussed is the science strategy towards the mission goal via achieving its objectives.

MMXにおける火星観測

Observation of Mars in MMX mission

*今村 剛¹、小郷原 一智²、笠羽 康正³、青木 翔平⁶、田口 真⁴、亀田 真吾⁴、吉川 一朗⁵

*Takeshi Imamura¹, Kazunori Ogohara², Yasumasa Kasaba³, Shohei Aoki⁶, Makoto Taguchi⁴, Shingo Kameda⁴, Ichiro Yoshikawa⁵

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、2.滋賀県立大学 工学部、3.東北大学大学院 理学研究科、4.立教大学 理学部、5.東京大学大学院 新領域創成科学研究科、6.Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Prefecture School of Engineering, The University of Shiga, 3.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.College of Science, Rikkyo University, 5.Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo, 6.Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica

火星の気候形成において要となる、水や二酸化炭素など揮発性物質の宇宙空間への散逸や、表層の様々な水リザーバ間の水輸送は、大気中の水蒸気量、大気-地殻間の水交換、大気大循環に強く影響される。地球では水蒸気の温室効果や潜熱が担う熱的效果を、火星では大気ダストの放射効果が担っているため、上記の理解のためには水や大気物質のみならずダストの挙動の理解も必須である。

大気-地殻間の水交換には、様々な大気現象、とくに大規模地形の影響を受けた局地気象や数十Kに達する気温の日変化に伴う相変化が関わっていると想像される (Melchiorri et al. 2009)。たとえば赤道域の上昇流域での氷雲形成が上層大気の水蒸気量を規定する、特定地域での氷雲形成がwater equivalent hydrogenの不均一分布を説明する、などの可能性が指摘されている (Feldman et al. 2005)。しかし従来の極軌道の火星周回機による水蒸気や氷雲の観測では広域のマッピングに数十日を要し、このような短時間スケールの現象をとらえることができなかった。

大気ダストのうち、年間を通して存在する背景ダスト成分は、供給源が特に謎に包まれている (Kahre et al. 2006)。候補となる流体現象の多くが顕著な地方時依存性や日変化サイクルを伴うと想像されており、そのような時間発展はMGS、Mars Expressなど従来の極軌道の火星周回機によって得られる1太陽日に1枚のモザイク画像ではとらえられなかった (Guzewich et al. 2015)。とくにダストプルームや斜面風といった特定の地方時において短時間で発達するメソスケールの現象は、近年発見された高高度でのダスト混合比の極大をもたらす可能性も指摘されているが、観測的手がかりがない (Heavens et al. 2011)。

火星表層の物質輸送においてこのように局地的で時間スケールの短い現象が重要となりうることは、火星大気が薄く、放射加熱や運動の時定数が短いことの帰結である。高空間分解能の連続リモートセンシングによって、局地的な水蒸気輸送や相変化の日変化サイクル、局地的で短時間スケールのダストストームの発生地域とライフサイクルを明らかにすることが、火星気候の支配メカニズムの理解につながる。MMXの高高度の火星周回軌道からは、南北両半球の広範囲を継続的に観測することが可能であり、このような研究のための理想的なプラットフォームと言える。そこで我々は、時間分解能1時間程度で周回ごとに数時間にわたって大気的光・撮像観測を行うことを検討している。この連続モニターを数日間続けるキャンペーン観測を間欠的に行い、日変化スケールから季節変化までの変動を把握する。観測機器としては、現時点では可視カメラ、近赤外分光撮像器、熱赤外カメラ、紫外分光器が候補である。

キーワード：火星、大気、MMX

Keywords: Mars, Atmosphere, MMX

フォボス内部構造の理解へ向けた戦略

Key observations to understand the internal structure of Phobos

*宮本 英昭¹、新谷 昌人²、松本 晃治³、寺田 直樹⁴、西堀 俊幸⁵、菊地 紘¹、逸見 良道¹、新原 隆史¹、田中 宏幸²、小川 和律⁶

*Hideaki Miyamoto¹, Akito Araya², Koji Matsumoto³, Naoki Terada⁴, Toshiyuki Nishibori⁵, Hiroshi Kikuchi¹, Ryodo Hemmi¹, Takafumi Niihara¹, Hiroyuki Tanaka², Kazunori Ogawa⁶

1.東京大学総合研究博物館、2.東京大学地震研究所、3.国立天文台、4.東北大学大学院理学研究科、5.宇宙航空研究開発機構、6.神戸大学

1.The University Museum, The University of Tokyo, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.RISE Project Office, National Astronomical Observatory, 4.Graduate School of Science, Tohoku University, 5.JAXA, 6.Kobe university

Observations of Phobos by many spacecraft such as Viking orbiter, Mars Global Surveyor, Mars Odyssey, Mars Express, and Mars Reconnaissance Orbiter provided variety of datasets of the satellite including visible and color images, UV spectrum, global and high-resolution near IR and IR reflectance spectrum, radar reflectance, and precise orbiting parameters. However, because all of these missions have studied Phobos at distance, critical observations such as high-resolution imaging and precise gravity measurements have not been performed yet. In addition, Phobos exists in a very unique circum-Martian environment, which is significantly different from asteroids in the main belt. For example, impacts to Phobos should show the leading and trailing asymmetry due its synchronous rotation, which should also affect the deposition rates of re-impact of ejecta originated from Phobos itself. Also, the surface should have experienced space weathering due not limited to solar wind but also escape ions from Mars. Secondary impacts from Mars may contaminate the regolith of Phobos as well. Thus, understanding these processes is necessary to obtain a basic picture of surface evolution of the satellite. Important and necessary observations in the future mission would include (1) comprehensive mapping of craters and boulders, (2) study of sedimentary structures (if any) of regolith (layers) at high-resolution images, (3) high-resolution observations of geological features including grooves and depressions, (4) understanding of the degree of space weathering and its spatial distribution, and (5) a detection of dust ring on Phobos orbit.

The two distinctive color units observed on Phobos are interpreted in several ways, including an exposure of fresh internal materials over relatively weathered and totally different geological unit. In either case, their nature and understanding the surface processes would be important to derive information regarding its internal structure. Importantly, we do not know if an internal core exist or not, or even if the internal Ice exist (can vary from 0 to 60%). Also, the estimated bulk porosity can vary up to 70% and the surface materials may not represent the body. Therefore, key observations regarding the internal structure would include: (1) Detection of internal water-ice, which may be constrained by measurements of ion flux from inside, (2) Rough structure of the body in terms of gravity, (3) Shallow but precise subsurface structures including regolith thickness, contamination, layering, and the existence of base rock, which may be constrained by gradiometer observation, radar sounder, and lander's in-situ packages for porosity and particle size, (4) Exact density value at anywhere, which may be performed by Muography instrument.

キーワード：フォボス、内部構造、火星衛星探査計画

Keywords: Phobos, internal structure, MMX

衝突点近傍から放出されるイジェクタ速度とその質量：フォボスへの火星物質の輸送

The velocity and mass distributions of impact ejecta in the vicinity of the impact point:
An application to the material transport from Mars to Phobos

*岡本 尚也¹、黒澤 耕介¹、玄田 英典²、長谷川 直³、鈴木 絢子³、和田 浩二¹、松井 孝典¹

*Takaya Okamoto¹, Kosuke Kurosawa¹, Hidenori Genda², Sunao Hasegawa³, Ayako Suzuki³, Koji Wada¹, Takafumi Matsui¹

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.東京工業大学地球生命研究所、3.宇宙航空開発機構宇宙科学研究所
1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Earth-Life Science
Institute, Tokyo Institute of Technology, 3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan
Aerospace Exploration Agency

高速度衝突によって発生するイジェクタのうち非常に速いものは極めて遠方まで輸送される。フォボス表面には衝突によって放出された火星物質が含まれていることが議論されている(Ramsley and Head 2013)。どのぐらいの火星物質がフォボスへ輸送されるかという問題を考えるには、衝突点近傍で放出されるイジェクタの最高速度とその質量を調べる必要がある。

過去に弾丸半径以遠から放出される衝突イジェクタの速度分布を調べた研究はあるが(e.g. Hermalyn and Schultz 2011, Tsujido et al., 2015), 衝突点直下から放出される高速なイジェクタは十分に観察されていない。また、数値コードを用いてイジェクタの振る舞いを詳細に調べた研究があるが(Johnson et al., 2014), 正面衝突のみを調べたものであり、斜め衝突については調べられていない。またシミュレーションの結果を高速度衝突実験の結果と比較を通して結果の妥当性が検証されてはいない。

本研究では高速度衝突実験を行い、衝突点近傍から放出される非常に速いイジェクタを高速度ビデオカメラで観察しその速度を調べた。我々はSPHコードを用いた衝突シミュレーションも行い、実験との比較を通してシミュレーション結果の妥当性を検証した。また実験からは決めることが難しい高速イジェクタの質量を調べるとともに、標的由来の物質と弾丸由来の物質がイジェクタ中でどのように分布しているかを調べた。

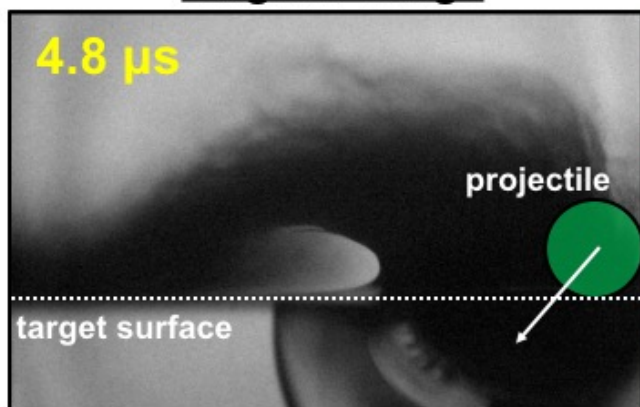
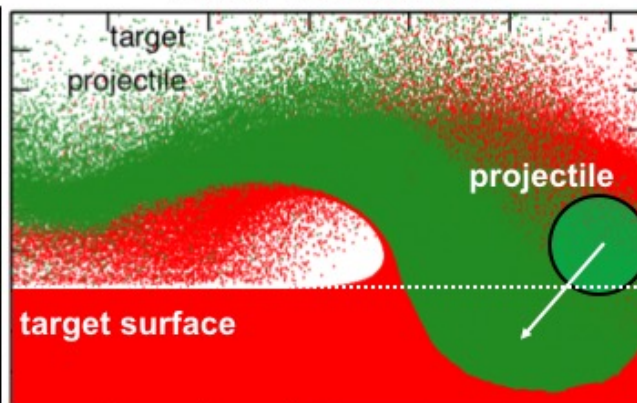
弾丸と標的にはポリカーボネイトを用いた。衝突速度は3.56-7.04 km s⁻¹で、衝突角度は90度(正面衝突)と45度で実験を行った。高速度衝突実験には千葉工業大学と宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。高速度ビデオカメラを使用し衝突現象を0.2 μs frame⁻¹で観察した。宇宙科学研究所での実験では高速度ビデオカメラを2台使用し、上方向と横方向から撮影した。

3次元SPHコード(e.g. Genda 2012)を用いて衝突シミュレーションを行った。弾丸には10⁴, 10⁵, 10⁶ 個のSPH粒子を用いて、空間解像度の影響がイジェクタの振る舞いに与える影響を調べた。

衝突実験から、正面衝突ではイジェクタカーテンの形状は軸対称であることが観察された。一方、斜め衝突ではイジェクタカーテンの形状は非対称であり、別々の方向に放出する二成分のイジェクタが観察された。一つは標的表面に沿って弾丸の軌道の下流方向に移動するものである。これは弾丸貫入時に起こるjetting過程によって生成されたものだと考えられる(Kurosawa et al., 2015)。もう一つは標的表面から斜め上方へ放出される成分である。この二つの成分の境界では折れ曲がりの構造が観察された。最も高解像度のSPHコードの計算結果(弾丸の粒子数が10⁶個)は実験結果のイジェクタカーテンを良く再現しており、衝突点から遠方に飛んでいるイジェクタや斜め衝突における二成分のイジェクタ、折れ曲がりの構造が観察された。また正面衝突におけるイジェクタカーテンの端はほぼ標的物質が占めているのに対し、斜め衝突における標的表面に沿って移動する放出物の先端は弾丸物質が占めていることが分かった。これらの結果をもとに火星からフォボスへの物質輸送の問題について議論する。

キーワード：イジェクタ、高速度衝突実験、SPHシミュレーション

Keywords: ejecta, hyper-velocity impact experiment, SPH simulation

Original imageSPH simulation

Origin and evolution of Phobos: Scientific objectives awaiting particle measurements by MMX

Origin and evolution of Phobos: Scientific objectives awaiting particle measurements by MMX

*寺田 直樹¹、関 華奈子²、二穴 喜文³、Leblanc Francois⁴、横田 勝一郎⁵、斎藤 義文⁵、松岡 彩子⁵、野村 麗子⁵、山崎 敦⁵、栗原 純一⁶、三浦 弥生⁷、馬上 謙一⁶、岡崎 隆司⁸、中村 智樹¹、亀田 真吾⁹、長 勇一郎⁹、火星衛星探査計画 科学検討チーム

*Naoki Terada¹, Kanako Seki², Yoshifumi Futaana³, Francois Leblanc⁴, Shoichiro Yokota⁵, Yoshifumi Saito⁵, Ayako Matsuoka⁵, Reiko Nomura⁵, Atsushi Yamazaki⁵, Junichi Kurihara⁶, Yayoi N. Miura⁷, Ken-ichi Bajo⁶, Ryuji Okazaki⁸, Tomoki Nakamura¹, Shingo Kameda⁹, Yuichiro Cho⁹, science team MMX mission

1.東北大学大学院理学研究科、2.東京大学大学院理学系研究科、3.スウェーデン国立スペース物理研究所、4.フランス大気環境宇宙観測研究所、5.宇宙航空開発研究機構・宇宙科学研究所、6.北海道大学大学院理学研究院、7.東京大学地震研究所、8.九州大学大学院理学研究院、9.立教大学理学部

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, The University of Tokyo, 3.Swedish Institute of Space Physics, 4.Laboratoire Atmospheres, Milieux, Observations Spatiales, 5.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 6.Graduate School of Science, Hokkaido University, 7.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 8.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, 9.School of Science, Rikkyo University

In this presentation, we will present scientific objectives of particle measurements by the Mars Moon eXploration (MMX) mission. The MINE (Magnetic field, Ion and Neutral Experiment) package consisting of five instruments (MSA, MIA, REN, NIMES, and MGF) and MEC (Mars Escaping atmosphere Capturing device) have been proposed as possible payloads of the MMX mission. MINE and MEC would perform particle measurements corresponding to the following three scientific objectives: (1) To obtain indirect information on the Phobos internal structure in order to constrain the origin of Phobos independent of the sample analysis results. (2) To characterize the space environment and the surface features of Phobos, with the intention of comparison with asteroids. (3) To constrain the total amount of atmosphere lost from Mars to space during its history. Details of these three scientific objectives will be presented.

キーワード：Phobos、Mars、Particle

Keywords: Phobos, Mars, Particle

火星衛星表面から放出されるガンマ線・中性子の数値シミュレーション

Gamma-ray and Neutron Emission from the Surface of Martian Moons

*内藤 雅之¹、長岡 央¹、吉田 康平¹、石井 隼也¹、青木 大輔¹、草野 広樹²、長谷部 信行^{1,2}*Masayuki Naito¹, Hiroshi Nagaoka¹, Kouhei Yoshida¹, Junya Ishii¹, Daisuke Aoki¹, Hiroki Kusano², Nobuyuki Hasebe^{1,2}

1.早稲田大学先進理工学研究科、2.早稲田大学理工学研究所

1.School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2.Research Institute for science and Engineering, Waseda University

Mars has two moons "Phobos" and "Deimos" which have never been explored. Japanese mission to Martian moons "Mars Moon eXploration (MMX)" is planned to obtain some evidences for determining the origin of Martian moons. This mission will pick up rock and soil sample from Phobos to the Earth to analyze in detail by laboratory techniques. There are two influential scenarios about the origin of the Martian moons, captured asteroid origin and giant impact origin. However, any previous studies have never succeed to explain the origin of the Martian moons completely.

The chemical composition of the Martian moons which is essential information for planetary science has not been observed before. Gamma-ray and Neutron Spectrometer (GNS) is proposed as one of the mission payloads in order to determine elemental compositions of two Martian moons by remote sensing. The captured asteroid origin indicates Martian moons of primitive chondritic composition which enriches with volatile elements (H, S) and depleted with Si and Ca [1]. On the other hand, Martian materials ejected by the giant impact made the moon if they have similar composition to Mars which is considered to be rich in Si and Ca [2]. Moreover, volatile elements are depleted because of evaporation by impact heat. Therefore, the ratios of Si/Fe, Ca/Fe and H concentration will be important indicators to give a constraint to the origin of Martian moons.

In this work, we have investigated gamma-ray and neutron emission depending on chemical composition and H concentration to support the potential to distinguish sample compositions by the GNS. The elemental composition of Martian meteorites and some types of chondrites were assumed as the giant impact origin and the captured asteroid origin, respectively. H concentration in these elemental compositions were varied in the range of 0-20000 ppm. Production and transportation of gamma-rays and neutrons produced by galactic cosmic rays (H and He; 10 MeV/n-100 GeV/n) were calculated by using the Monte Carlo simulation code PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [3] and the INCL (Intra Nuclear Cascade of Liège) nuclear interaction model [4].

The Si/Fe and Ca/Fe ratios of gamma-rays emitted from Martian composition showed high values while that from chondrite composition showed low values. There are some differences in the shape of neutron energy spectra between Martian and chondritic samples. The neutron energy spectrum from chondrite shows a peak at the energy range of thermal neutron < 0.5 eV and a low flux of epithermal neutron energy from 0.5 eV to 500 keV comparing to that from Martian meteorite. In contrast, the shapes of fast neutron flux > 500 keV almost correspond. It is considered that the differences of H concentration in the sample composition caused this differences in neutron spectra since H atoms moderate neutrons effectively. The neutron fluxes were significantly varied depending on H concentration. Fast and epithermal neutron fluxes decreased with H concentration while thermal neutron flux increased until 2000 ppm of H and decreased above the value. Epithermal neutron flux is effective to determine H concentration since the change of epithermal neutron was larger than that of thermal and fast neutrons. By combining the ratios of Si/Fe and Ca/Fe and H concentration determined by gamma-rays and neutrons, the GNS will give an important constraint to the origin of the Martian moons.

The simulation results of the Martian moons will be presented and discussed.

[1] E. Jorosewich, *Meteoritics* 25 (1990) 323.

[2] NASA Martian meteorite Compendium, <http://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>.

[3] T. Sato et al., *J. Ncl. Sci. and Technol.* 50 (2013) 913.

[4] A. Boudard et al., *Phys. Rev.* C87 (2013) 014606.

キーワード：ガンマ線中性子分光計、火星衛星、GNS

Keywords: Gamma-ray and Neutron Spectrometer, Martian moons, GNS

火星衛星の起源について

On the origin of Martian moons

*玄田 英典¹、兵頭 龍樹^{2,3}、Charnoz Sebastien³、Rosenblatt Pascal⁴

*Hidenori Genda¹, Ryuki Hyodo^{2,3}, Sebastien Charnoz³, Pascal Rosenblatt⁴

1.東京工業大学 地球生命研究所、2.神戸大学、3.IPGP、4.Royal Observatory of Belgium

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.Kobe University, 3.IPGP, 4.Royal Observatory of Belgium

火星衛星の起源についてのレビューを行い、最近の著者らの研究成果について発表する。MMXミッションが目指すサイエンスについても紹介をする。

キーワード：サンプルリターン、火星衛星、起源

Keywords: sample return, Martian moons, origin

火星衛星サンプルリターン探査機搭載近赤外分光器によるフォボス・ダイモスおよび火星大気リモートセンシング計画

Development of near- and mid-infrared imaging spectrometers for the Martian moon's sample return mission and next generation space projects

*坂野井 健¹、岩田 隆浩²、中村 智樹⁴、笠羽 康正⁴、田口 真⁵、中川 広務⁴、鍵谷 将人¹、山崎 敦²、青木 翔平³、佐藤 隆雄²

*Takeshi Sakanoi¹, Takahiro Iwata², Tomoki Nakamura⁴, Yasumasa Kasaba⁴, Makoto Taguchi⁵, Hiromu Nakagawa⁴, Masato Kagitani¹, Atsushi Yamazaki², Shohei Aoki³, Takao M. Sato²

1.東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター、2.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3.イタリア国立天文学研究所宇宙惑星研究所、4.東北大学大学院理学研究科、5.立教大学理学部

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, 2.JAXA, ISAS, 3.Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, INAF, 4.Graduate School of Science, Tohoku University, 5.College of Science, Rikkyo University

We report the current design of near-infrared spectrometer for the MMX (Mars Moon eXploration) mission, and also discuss near- and mid-infrared spectroscopy for next generation space projects with advanced imaging technology. MMX spacecraft is scheduled to be launched in the early 2020s, orbits Phobos and Deimos, and returns samples from Phobos back to Earth in the late 2020s. Near-infrared spectroscopy is useful to understand the material distribution on Martian moons (e.g., hydroxide minerals at 2.7–2.8 μm , hydrated minerals at 3.0–3.2 μm , and organics at 3.4–3.4 μm) and dynamics in Martian atmosphere (e.g. H₂O at 2.5–2.65 μm , and pressure with CO₂ absorption at 1.2–2.2 μm). We proposed a near-infrared spectrometer NIRS4 for the MMX mission to carry out the near-infrared spectroscopic measurement of the Martian moons Phobos and Deimos and Martian atmosphere. NIRS4 is based on the NIRS3 on the Hayabusa-2 spacecraft, which has a fast optics (F-number 1.4) with a long slit corresponds to a wide field-of-view (FOV) of 14.6 x 0.03 deg. NIRS4 covers the target area of 26 km length with 100 m spatial resolution looking from 100 km altitude. It also achieves 20 m and 1 m spatial resolution, respectively, from altitudes of 20 km and 1 km. A grism is put in the collimating optics, and its wavelength resolution is ~ 1.5 to 3 nm (R~650 to 1000). A 2D HgCdTe array (640 x 512 pixel, pixel size 15 x 15 microns, sensitivity range 1–3.8 microns) is used as a detector. The detector and optical system are cooled down below 90 K and 190 K with a Stirling cooler to reduce thermal noise. As an order sorter of dispersion light, we put 1–1.9 μm (1st order) filter on a half part of the slit, and 1.9–3.8 μm (2nd order) filter on the other half of the slit. In this way, a half FOV (7.3 x 0.03 deg) with wavelength range of 1–1.9 μm is focused on a half side of 2D detector (640 x 256 pixel area), and the other half FOV with wavelength of 1.9–3.8 μm is focused on the other half of the detector. The calibration lamp is used to determine the absolute wavelength. An optical chopping system which periodically interrupts an incident light to determine the background level precisely and to gain the signal-to-noise ratio.

キーワード：火星、サンプルリターン、近赤外分光器

Keywords: Mars, MMX, near-infrared spectrometer

火星衛星探査計画(MMX)搭載提案機器：分離カメラシステム5 (DCAM5)

Deployable Camera system 5 (DCAM5) proposed for Martian Moon Exploration mission (MMX)

*和田 浩二¹、澤田 弘崇²、小川 和律³、白井 慶²、坂谷 尚哉²、石橋 高¹、本田 理恵⁴、保井 みなみ³、荒川 政彦³

*Koji Wada¹, Hirotaka Sawada², Kazunori Ogawa³, Kei Shirai², Naoya Sakatani², Ko Ishibashi¹, Rie Honda⁴, Minami Yasui³, Masahiko Arakawa³

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3.神戸大学、4.高知大学
1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.ISAS/JAXA, 3.Kobe Univ., 4.Kochi Univ.

We propose Deployable Camera system 5 (DCAM5) for remote and in situ observations of Phobos and Deimos in Martian Moon Exploration mission (MMX) led by JAXA. DCAM5 is the latest version of the DCAM series in space missions (DCAM1 and 2 were successfully operated in IKAROS mission and DCAM3 is equipped on Hayabusa2 mission). In this mission MMX, DCAM, a small handy-sized body equipped with several visible cameras, a triaxial accelerometer, batteries, and a communication unit will be separated from the spacecraft (SC) and thrown toward scientifically valuable regions of Phobos and Deimos where SC cannot approach nor land on, e.g., inner wall of Stickney crater.

As falling toward a target region, DCAM will take multiscale, multiband images of the target regions with a multiband camera equipped on the leading edge of DCAM. Multiband images with high resolutions down to ~ 1 cm/pix will reveal spectroscopic characteristics of the target region, such as the distribution of hydrated minerals and the texture of boulders which could reflect the thermal evolution of Phobos and Deimos. When DCAM collides to Phobos surface, we will measure the acceleration profiles at collision as an indicator of the mechanical properties of the landing point. From the acceleration profiles we will obtain the following properties depending on the nature of the landing point: (1) in the case of landing on a boulder, disruptive strength of boulders, which allows us to estimate Q^* value reflecting the thermal evolution of Phobos, (2) in the case of landing on a regolith layer, penetration resistance (drag coefficient) of regolith layers which allow us to constrain the surface evolution inherent to Martian moons, and (3) in the case of a fine powder layer, compression curves of powder layers which reflects the porosity and the cohesion of the layer, constraining the levitation process on small bodies and the compression evolution of fluffy bodies such as planetesimals. After landing of DCAM, we will take close-up images of the surface to clarify the size and the porosity of the surface regolith.

Since DCAM is a light and small body, several DCAMs are preferred to be equipped and thrown toward different, valuable regions to reveal the origin and the evolution of Phobos and Deimos. Furthermore, we propose two objectives of DCAM5 other than the described above: one is to investigate candidate landing points on Phobos before landing of SC and the other is to observe the status of SC at around its landing and the disturbance of the landing points. Since each objective is achieved with one or more DCAMs, we need 3 DCAMs at least in order to complete all the objectives.

キーワード：火星衛星、惑星探査、搭載機器、分離カメラ

Keywords: Martian moons, planetary exploration, onboard instrument, DCAM

火星衛星サンプルリターン計画におけるフォボス表面・内部探査の提案

Geophysical experiments on Phobos proposed for JAXA Mars Moon Exploration mission

*小川 和律¹、田中 智²、坂谷 尚哉²、上野 宗孝^{1,2}、星野 健²、坂本 和敏²、川村 太一³、石原 吉明²、竹内 希⁴、Philippe Lognonné³、新谷 昌人⁴、山田 竜平⁵、辻 健⁶、小林 泰三⁷、白井 慶⁸、Matthias Grott⁹、Jerzy Grygorczuk¹⁰、Axel Hagermann¹¹、Jörg Knollenberg⁹、Tilman Spohn⁹、宮本 英昭⁴、桂木 洋光¹²、城野 信一¹²、諸田 智克¹²、荒川 政彦¹

*Kazunori Ogawa¹, Satoshi Tanaka², Naoya Sakatani², Munetaka Ueno^{1,2}, Takeshi Hoshino², Kazutoshi Sakamoto², Taichi Kawamura³, Yoshiaki Ishihara², Nozomu Takeuchi⁴, Philippe Lognonné³, Akito Araya⁴, Ryuhei Yamada⁵, Takeshi Tsuji⁶, Taizo Kobayashi⁷, Kei Shirai⁸, Matthias Grott⁹, Jerzy Grygorczuk¹⁰, Axel Hagermann¹¹, Jörg Knollenberg⁹, Tilman Spohn⁹, Hideaki Miyamoto⁴, Hiroaki Katsuragi¹², Sin-iti Shirono¹², Tomokatsu Morota¹², Masahiko Arakawa¹

1.神戸大学、2.宇宙航空研究開発機構、3.パリ地球物理研究所、4.東京大学、5.国立天文台、6.九州大学、7.福井大学、8.総合研究大学院大学、9.ドイツ航空宇宙センター、10.ポーランド科学アカデミー、11.オープン大学、12.名古屋大学

1.Kobe University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Institut de Physique du Globe de Paris, 4.University of Tokyo, 5.National Astronomical Observatory of Japan, 6.Kyushu University, 7.University of Fukui, 8.The Graduate University for Advanced Studies, 9.German Aerospace Center, 10.Polish Academy of Sciences, 11.Open University, 12.Nagoya University

Scientific instruments and their support devices are being proposed for geophysical experiments on Phobos as potential instruments for the Mars Moon Exploration mission (MMX). JAXA is currently planning a sample return mission to the martian moons. The spacecraft will stay in a quasi-orbit around Phobos for months or 1-2 years, and make scientific observations including remote sensing, landings on Phobos for sampling, and several flybys of Deimos. Scientific goals of MMX were defined as in the following two categories: (1) To reveal the origin of the Mars moons, and then to make a progress in our understanding of planetary system formation and of primordial material transport around the border between the inner- and the outer-part of the early solar system. (2) To observe processes that have impact on the evolution of the Mars system from the new vantage point and to advance our understanding of Mars surface environment transition. While a landing site for sampling is still under consideration, in a current plan the main spacecraft lands twice, on the "red" and "blue" areas on Phobos for example.

We proposed five scientific instruments for this mission. SEIS: a three-axes short-period seismometer and an active seismic vibration source, SSXT: a penetration probe of several tens cm length with temperature and thermal conductivity sensors, miniRAD: a miniaturized thermal infrared radiometer, a muon detector, and SUMIRE: a mechanical insertion resistance probe of 5 cm length. All these instruments basically aim at investigating the geophysical properties of the surface, sub-surface, and interior of Phobos, and their combined observations can provide integrated models of mechanical and thermal properties of the subsurface which has not been studied so far. The scientific objectives of these instruments are connected to the following mission objectives corresponding to the mission goals above: (a) To obtain indirect information on the Phobos internal structure in order to constrain the origin of Phobos independent of the sample analysis results. (b) To characterize the space environment and the surface features of Phobos, with the intention of comparison with asteroids.

Because the first four of the above scientific instruments require a long observation time at a fixed location, a long-lived landing package (MSM) is also proposed. SUMIRE is planned to be mounted on the feet of the mothership (main lander). Objectives of MSM are providing electric

power, command/telemetry interfaces, and an operable environment for the scientific instruments throughout a period of our observations over a Mars year. MSM has the following specifications and functions: (i) Operates independently from the mothership and survives at a fixed point of area. (ii) Controls internal temperature in an operable range of the scientific instruments for their continuous observations. (iii) Provides wired interfaces of telemetry/command and power to the scientific instruments. (iv) Communicates over a radio link with the mothership in orbits and with ground-based stations on the Earth. MSM will be placed on Phobos' surface during the landing sequence of the main spacecraft, and stay there over its entire lifetime.

キーワード：火星衛星サンプルリターン計画、火星衛星、フォボス、惑星探査、内部構造

Keywords: MMX, Martian moon, Phobos, Planetary exploration, Internal structure

非一様内部構造をもつフォボスの慣性モーメント

Moments of inertia of Phobos with inhomogeneous internal structure

*松本 晃治¹、池田 人²*Koji Matsumoto¹, Hitoshi Ikeda²

1.国立天文台RISE月惑星探査検討室、2.宇宙航空研究開発機構研究開発本部

1.RISE Project Office, National Astronomical Observatory, 2.RDD/JAXA

The origin of Phobos is still an open issue. It may be either captured asteroid or formed from a disk of impact ejecta produced by a giant impact. Although it is not straightforward to determine the origin from internal structure alone, it will place important constraints. One of the key parameters related to the internal structure is moments of inertia (MOI). Phobos's MOI can be determined from amplitude of short-period forced libration and degree 2 gravity coefficients. Currently, the libration amplitude is estimated to be 1.09 ± 0.01 degrees by analyzing multiple image data [1]. Although the degree 2 gravity coefficients are estimated from tracking data of Mars Express on its close flyby at Phobos, they are not solved for at sufficient accuracy [2]. Axial difference of MOI can be constrained by the libration amplitude, but currently MOI of Phobos is not known. The observed libration amplitude is consistent with homogenous mass distribution of Phobos, but local mass anomalies cannot be ruled out [1, 3]. Here we consider relatively simple two-layer internal structure and assume that ice water or porosity is confined in either layer, and calculate how much MOI deviate from the value for homogeneous body if such an inhomogeneity existed. Phobos's bulk density of 1.86 ± 0.013 g/cm³ [4] is lower than most of the samples of carbonaceous material, which requires porosity and/or light elements like water ice. If the low bulk density was explained by water ice, its mass fraction is expected to be 10-35% depending on rocky material grain density [5]. If the mass distribution inside Phobos was inhomogeneous, e.g., water ice was concentrated near the surface or the center, we will observe a deviation of MOI from the value for homogenous interior. Here the MOI differences (dMOI) with respect to the homogenous Phobos are calculated for some cases where we assumed that (1) Phobos has a tri-axial ellipsoidal figure ($a = 13.03$ km, $b = 11.40$ km, $c = 9.14$ km), (2) Phobos has a two-layer structure and their boundary also has the similar ellipsoidal figure for which the libration amplitude is 1.15 degrees being consistent with the observed value of [1], and (3) water ice is confined either of the upper or lower layer and rock density is the same for both the layers. The water ice mass fraction is changed between 0 and 30%.

In the case that upper layer is composed of the rock plus water ice, when the upper layer thickness is 10% of the semi-principal axes, no more than 14 wt.% of water can be contained in the layer and the maximum dMOI is about 9%. When the layer boundary is deeper, more water can be contained, but the maximum dMOI is about 16%. In the case that the water ice is confined in the lower layer, the maximum dMOI is also about 17%.

We also tested the cases in which the porosity is responsible for the low bulk density. We calculated due to inhomogeneous distribution of the porosity using the similar two-layer structure. The results depend on the boundary depth and rock density. In the case that the lower layer is porous, the maximum dMOI is about 17% when rock density is 2400 kg/m³, and about 9% when rock density is 2100 kg/m³.

It is found that, for the layer configuration assumed here, dMOI is smaller than 16-17%. A 10% accuracy will not be sufficient, and it is required to achieve at least a few percent of MOI accuracy in order to detect it. To this end, the required accuracies for the libration amplitude and the degree 2 gravity coefficients are also a few percent.

References:

- [1] Oberst et al. (2014) *Planet. Space Sci.*, 102, 45-50.
- [2] Pätzold et al. (2014) *Icarus*, 229, 92-98.
- [3] Rambaux et al. (2012) *Astron. Astrophys.*, 548, A14.
- [4] Willner et al. (2014) *Planet. Space Sci.*, 102, 51-59.
- [5] Rosenblatt (2011) *Astron. Astrophys. Rev.*, 19 (44).

キーワード：フォボス、内部構造、慣性モーメント

Keywords: Phobos, internal structure , moments of inertia

火星衛星フォボス上クレーターの形状緩和の評価

Topographic degradation of craters on the moon of Mars, Phobos

*森田 晟也¹、諸田 智克¹、渡邊 誠一郎¹*Seiya Morita¹, Tomokatsu Morota¹, Sei-ichiro Watanabe¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

火星衛星フォボス、デイモスの成因は未だ論争中であり、その後の進化も不明確である。数値シミュレーションによる先行研究によると、内側を周回する衛星フォボスから放出された衝突放出物のうち、ほとんどが火星軌道に捕獲され、フォボスに再衝突し、その再衝突により再び衝突放出物が生み出される。このような再堆積過程はフォボスの厚いレゴリス層に整合的である。また、このような再堆積過程はフォボス上のクレーター形状にも影響を与えられとされる。それゆえ、クレーター形状はフォボスの表層進化の理解に重要な鍵を握っていると考えられる。クレーター形状の評価を行う際、リムが明確に判断できる月とは異なり、重力の小さいフォボスではクレーターに明確なリムが存在しない。そこで重力の小さい天体に対するクレーター形状の新しい評価方法の開発が必要である。

月におけるクレーター形状の進化は、小天体衝突の積み重ねによって起こる地形拡散プロセスに従うと考えられている。しかし長いタイムスケールで見た時、いずれクレーター周辺に巨大なクレーターが衝突し、地形拡散プロセスでは記述できないクレーター緩和が起こると期待される。一方でフォボスにおけるクレーター形状は、先行研究で提唱された放出物の再堆積過程に従い、衝突放出物がフォボス全球に対し平均的に影響を与える。巨大な衝突に対してもその衝突放出物はフォボス全球へ広がり再堆積するため、個々のクレーターに対する影響は月に比べ少なくなる。すなわち、フォボスでは月よりも長いタイムスケールでの拡散プロセスに従ったクレーター緩和が期待される。

そこで本研究では、小天体のクレーターに対し適用可能な地形拡散モデルに基づいてクレーター形状を解析し、フォボスのクレーター形状の緩和度合いを推定した。具体的には、半径1km以上の20個のクレーターに対し平均地形プロファイルを作成し、変曲点の位置が変化しない地形拡散モデルが予想する地形プロファイルと比較を行った。

結果として、ほぼ全てのクレーターの地形プロファイルは地形拡散モデルに整合的であることが分かった。加えて、それぞれのクレーターの最大傾斜は深さを変曲点半径で規格化した値に対し比例関係があることが分かり、これも地形拡散モデルが予想するクレーター形状に整合的である。また、この最大傾斜と深さを変曲点半径で規格化した値から個々のクレーターの地形拡散モデルにおける年代 kt (k は地形拡散係数, t はクレーターが形成してからの経過時間を表す) を推定することが出来る。そこで推定された kt の頻度分布を作成したところ、クレーターは相対的に小さい kt に集中し、これは k が天体衝突率に比例する拡散モデルに整合的でない。これらの結果はフォボス表面において、単に k が天体衝突率に比例する拡散モデルでは説明できない何か特有のイベントが起こり、それ以前につくられていたクレーターの緩和を進行させた可能性を示唆する。

キーワード：フォボス、クレーター、地形緩和

Keywords: Phobos, crater, degradation

Geological investigation of the blue unit on Phobos

Geological investigation of the blue unit on Phobos

*菊地 紘¹、宮本 英昭¹、逸見 良道¹*Hiroshi Kikuchi¹, Hideaki Miyamoto¹, Ryodo Hemmi¹

1. 東京大学総合研究博物館

1. The University Museum, The University of Tokyo

The surface of the Martian satellite, Phobos, is spectrally divided into two units: red and blue. Understanding their difference may be key to determining the origin and evolution of Phobos, because the blue unit has commonly been interpreted to be composed of original materials of Phobos. Whereas the red unit is distributed nearly globally, the blue unit maps to some relatively small impact craters and the largest crater on Phobos, ~ 9 km-diameter Stickney crater, and its nearby surroundings. Hypotheses to explain its distribution include: (1) emplacement of low-velocity ejecta from the Stickney impact [1], (2) landslide materials extending to the west of Stickney crater [2], and (3) an inner heterogeneous structure of Phobos [e.g., 3; 4]. Regarding (1), Thomas 1998 suggests that low-velocity Stickney ejecta are capable of distributing asymmetrically due to the effects of Phobos' rapid spin, however the emplacement velocity did not be considered. The ejecta may have been emplaced beyond the extent hypothesized. Using high-resolution images, we investigate this with high precision.

We examine the largest region of the blue unit east of Stickney by: changing the NIR/BG color ratio for the western part of HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) images based on the analysis of [5]. In order to compare these maps, we create a dynamical potential map by dividing the numerical shape model [6] into 1,672,215 small triangular pyramid. From the tidal, centrifugal, and self-gravitational forces [7], we calculate the dynamical potentials at 121,770 points on the surface of Phobos. In addition, we perform numerical simulations in order to examine the relationships between the patterns of Stickney ejecta and regions of blue unit. Considering the rotation of Phobos, as well as the gravity of Phobos and Mars, we map the emplacement where the simulated orbit of particles and the sphere of Phobos intersect and calculate the emplacement velocities based on our simulations. In the calculation of the potentials and the simulations, we change values of the distance between Phobos and Mars from 20,000 km to 9,376 km to account for the changing distance through time. Moreover, we calculate the angle and the direction of the potentials.

As a result, many blue materials exist on the floor of craters and grooves. Comparing the spatial extent of the blue unit in the region east of Stickney crater to the slope map, a greater occurrence of the blue unit is observed on gentle slopes with increasingly less occurrence with greater slope angle. When performing comparative analysis among the maps generated based on varying orbital distances, the extent of the blue unit appears to be consistent with the current orbit. From our simulations, the emplacements of low velocity ejecta of Stickney cover one of blue unit regions east of Stickney.

Our results suggest that blue material easy to move rather than red material. Moreover if the origin of materials composing the blue unit is ejecta of an impact crater of Phobos, the emplacement velocity of the ejecta deposits must be lower than the escape velocity of Phobos. Based on these investigations, we interpret that the Stickney crater is underpinned by the blue unit with its surface being modified into the ubiquitous red unit through space weathering among other processes. Subsequently, the impact event except for Stickney might expose fresh blue materials.

[1] Thomas P. C. (1998) *Icarus*, 131, 78-106. [2] Shingareva T. V. and Kuzmin R. O. (2001) *Sol*.

Syst. Res, 35, 431-443. [3] Murchie S. et al. (1991) *JGR*, 96, 5925-5945. [4] Basilevsky A. T. et al. (2014) *PSS*, 102, 95-118. [5] Thomas N. et al. (2011) *PSS*, 59, 1281-1292. [6] Gaskell R.W. (2011) Gaskell Phobos Shape Model V1.0. V01-SA-VISA/VISB-5-PHOBOSSHAPE-V1.0. NASA Planetary Data System. [7] Thomas P. C. (1993) *Icarus*, 105, 326-344.

キーワード : Phobos、Blue unit、Stickney crater

Keywords: Phobos, Blue unit, Stickney crater

小惑星と火星衛星の揮発性（炭素）含有物質の固体と流体

Solids and Fluids of volatile (carbon)-bearing materials on Asteroids and Martian Moons

*三浦 保範¹*Yasunori Miura¹

1.客員（山口市、国内外大学）

1.Visiting (Yamaguchi, In & Out Universities)

はじめに：

小惑星と衛星（地球と火星の）は、地球のデータベースを用いて、形成時代と鉱物と組織等から、主に研究されている。 採集された隕石（小惑星と地球の月起源）の組織には、地球的な流体の残存が全くなく、固化した組織であると分かっている。本論文の主な目的は、小惑星と衛星（地球と火星）表面の固体化した流体の形成について解明して将来の探査に利用する事である。

隕石の流体の固化組織：

採集された隕石には、流体の水は発見されていなく、常温では回収できない。そして、隕石の特徴は、全圈的な水や流体（地球上）がないので多くの鉱物組成変動と岩石種の形成ができない。これらの隕石の流体形成は、隕石形成時に瞬間に形成され、隕石の粒子（結晶質鉱物の斑晶粒）を素早く結合させるために流体が移動して固化（やや結晶化の斑晶）し、石基（非晶質）となって固化していると特異な隕石組織から説明できる。レーザーによる熔融時の流体固化実験：

筆者は、本研究において炭素含有ターゲット岩石にレーザー照射実験を行い瞬間に発生した流体状態が素早く固化した岩石や組織を生成した。これは、流体水が実験前には岩石にはなかったが、レーザー照射過程で、流体液相が発生してから急冷して固体化されてことを示す。

別の実験で、回収した炭素質隕石の熔融実験で同じような流体発生有無の実験を行った。実験前に流体水がなかったが、実験後に流体水を生成した。

本実験の結果は、流体（水・二酸化炭素）を構成する元素、イオンが広く試料内に分散して存在しており、高温・衝撃の極限条件の温度圧力条件で、流体分子が形成されたことを示す。これは、水-惑星内部の循環する流体・熱水形成された多様な鉱物・岩石に比べて、隕石が限定した生成物しか示さないことが、説明できる。

小惑星における炭素含有物質の衝撃生成：

全ての揮発性元素を含む物質は、小惑星表面での衝撃後には蒸発して残存できないが、炭素含有物は例外である。

それを確認するため、隕石試料（アフリカと南極大陸）を電子顕微鏡で観察し、炭素含有微粒子が残っている結果が得られた。この実験結果は、全ての衛星や小惑星でも表面に炭素を含んだ微粒子が形成されていることを示す有意義な成果である。

衛星と小惑星のための期待される宇宙探査：

多くの小惑星において、揮発性の（炭素が主要）物質が継続的な小衝突過程（衝突孔を含む）または大衝突で破壊された小天体や粒子を形成している。これは物質活動に重要な揮発性物質（炭素や水素）を含む資源が、衝突の多かった小天体（衛星や小惑星）に形成残存して、将来の人的活動循環資源として利用できることを示す。

まとめ：

二衛星（火星）と小惑星上に揮発性の（炭素）含有物質が、宇宙資源のターゲットとして次期宇宙探査に利用され、人的な活動が可能な揮発性元素が形成されている場所と考えられる。これらは、本実験で隕石分析と人工レーザー実験で確認できている。

キーワード：固体と流体、揮発性（カーボン）含有物質実験、小惑星と火星衛星

Keywords: Solids and Fluids , Volatile (carbon)-bearing materials , Asteroids and Martian Moons

Gravity science investigation of Ceres from Dawn

*Ryan Park¹

1.Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2.IMCCE, Observatoire de Paris, Paris, France, 3.Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 4.Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, USA, 5.University of Toulouse, Toulouse, France, 6.UCLA, Los Angeles, CA, USA.

R.S. Park¹, A.S. Konopliv¹, B.G. Bills¹, N. Rambaux², J.C. Castillo-Rogez¹, C.A. Raymond¹, A.T. Vaughan¹, A. Ermakov³, M.T. Zuber³, R. Fu⁴, M.J. Toplis⁵, C.T. Russell⁶, ¹Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA (e-mail Ryan.S.Park@jpl.nasa.gov); ²IMCCE, Observatoire de Paris, Paris, France; ³Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA; ⁴Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, USA; ⁵University of Toulouse, Toulouse, France; ⁶UCLA, Los Angeles, CA, USA.

The Dawn gravity science investigation utilizes the DSN radiometric tracking of the spacecraft and on-board framing camera images to determine the global shape and gravity field of Ceres. The gravity science data collected during Approach, Survey, and High-Altitude Mapping Orbit phases were processed. Currently, the latest gravity field called CERES08A is available, which is globally accurate to degree and order 5. Combining the gravity and shape data gives the bulk density of $2163 \pm 8 \text{ kg/m}^3$. The low Bouguer gravity at high topography area, or vice versa, indicates that the surface of Ceres is likely compensated and that its interior presents a low-viscosity layer at depth. The degree 2 gravity harmonics show that the rotation of Ceres is very nearly about a principal axis. This is consistent with hydrostatic equilibrium at the 3% level. This infers that the mean moment of inertia of Ceres is , implying some degree of central condensation. Based on a simple two-layer model of Ceres and assuming carbonaceous chondrites and hydrostatic equilibrium, the core size is expected to be ~280 km with corresponding average thickness of the outer shell of ~190 km and density of $\sim 1950 \text{ kg/m}^3$.

Keywords: Ceres, Dawn, Dwarf planet

はやぶさ2搭載レーザー高度計による小惑星Ryuguのアルベド観測精度と炭素質コンドライトの反射率測定試験

The Instrument error on estimation of normal albedo of Ryugu using the laser altimeter on-board Hayabusa2 and the reflectance measurement of the carbonaceous chondrite at zero phase angle

*山田 竜平¹、千秋 博紀²、並木 則行¹、水野 貴秀³、阿部 新助⁴、吉田 二美¹、浅利 一善¹、野田 寛大¹、平田 成⁵、押上 祥子¹、荒木 博志¹、石原 吉明³、松本 晃治¹

*Ryuhei Yamada¹, Hiroki Senshu², Noriyuki Namiki¹, Takahide Mizuno³, Shinsuke Abe⁴, Fumi Yoshida¹, Kazuyoshi Asari¹, Hiroto Noda¹, Naru Hirata⁵, Shoko Oshigami¹, Hiroshi Araki¹, Yoshiaki Ishihara³, Koji Matsumoto¹

1.国立天文台、2.千葉工業大学、3.宇宙航空研究開発機構、4.日本大学、5.会津大学

1.National Astronomical Observatory of Japan, 2.Chiba Institute of Technology, 3.Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Nihon University, 5.The University of Aizu

2014年12月末小惑星探査機「はやぶさ2」が近地球型のC型小惑星「Ryugu」を目指して打ち上げられた。我々は、はやぶさ2に搭載されるレーザー高度計(LIDAR)を使用して、レーザー波長(1064nm)におけるRyuguのアルベド分布を調べる事を計画している。はやぶさ2搭載用のLIDARには探査機-小惑星間の距離を測定する機能に加えて、レーザーパルスの送信光強度と受信光強度を測定する機能がついており、この強度データを用いてRyugu表面のノーマルアルベドを推定する事が可能である。

本研究では、LIDARで得られる送信光、受信光のデータからC型小惑星のアルベド値を推定する際、特に機器特性が観測精度に与える影響について評価した。この結果、地上試験より決めたLIDARの機器特性で、20kmの高度でアルベド推定値に18%の誤差を与える事が分かった。これに加えて、実際の観測時には、小惑星表面の傾斜の大きさやラフネスの程度によって、LIDARの受光パルスが変形し、受光強度が変化する。本発表ではこの小惑星の表面傾斜や、ラフネスがLIDARの受光パルスに与える影響についても述べる。

また、現在、Ryuguで観測されるアルベド変化の解釈のためLIDARの観測条件における炭素質コンドライトの反射率測定実験の準備を行っている。この実験では、ビームスプリッタを使用して1.064 μ m, 0deg位相での反射率測定を可能としている。また、他機器(可視カメラ、近赤外分光計)で得られた反射率測定データとの比較、統合のために位相角を0-30degまで変化させて測定する事も可能とした。本発表では、この実験の概要と初期測定結果についても報告する予定である

キーワード：小惑星アルベド、Ryugu、はやぶさ2、レーザー高度計、炭素質コンドライト、反射率測定

Keywords: Asteroid albedo, Ryugu, Hayabusa2, Laser altimeter, Carbonaceous chondrite, Reflectance measurement

低速度クレーター形成実験をもとにしたイトカワdimple地形の成因の検証およびフォボス表層地形との比較

The origin of Itokawa dimples and a comparison with the surface structure of Phobos

*木内 真人¹、中村 昭子¹

*Masato Kiuchi¹, Akiko Nakamura¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

はやぶさによる高解像度の表面画像より、小惑星イトカワ表層は浅いクレーター形状や不鮮明なリム、小さいサイズのクレーターが存在しないなど、独特の特徴をもつことが明らかになった(Hirata et al., 2009)。表面はメートルサイズのボルダーにより構成されるrough terrainとミリメートルからセンチメートルサイズの粒子層により構成されるsmooth terrainに区分される。smooth terrain にはボルダーが付随したdimpleと呼ばれる窪み地形が観察されている。この地形の成因として、ボルダーの低速度衝突(Nakamura et al., 2008)や、seismic shakingにより生じたボルダー下の窪み(Hirata et al., 2009)などが考えられているが、成因は明らかではない。このような表層地形の成因を明らかにすることは、天体の表層構造および表層進化の過程を推定する手がかりとなり得る。

イトカワ脱出速度 (0.17 ms^{-1}) を下回るような低速度衝突で形成されるクレーターサイズを推定するうえで、Holsapple (1993)のスケーリング則が適用可能かどうかは未知である。上記のスケーリング則はクレーターが衝突体に比べ十分に大きい場合を前提としているためである。また、クレーターサイズの重力依存性を実験的に調べた 研究は少ない。数少ない実験例として、高重力下(Schmidt and Housen, 1987) と低重力下(Gault and Wedekind, 1977) での高速度実験がそれぞれあり、クレーター直径は重力加速度の $-0.165 \sim -0.17$ 乗に比例するという結果が得られている。しかし実験例自体が少なく、低速度領域ではこれまで確かめられていない。

我々は、標的容器を定荷重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模擬的に小さくする装置を開発し、また標的容器を自由落下させる実験を行うことで、重力加速度を $0.01 \sim 1 \text{ G}$ の範囲で変化させた。シリカサンド標的(粒径 $\sim 140 \text{ }\mu\text{m}$)に直径 8 mm のステンレス球(密度: 7.9 gcm^{-3})を速度 $1\text{--}5 \text{ ms}^{-1}$ の範囲で衝突させた。結果、クレーター直径は重力加速度の -0.19 ± 0.01 乗に比例し、これは先行研究の高速度衝突での結果に近い値といえる(木内他、2015年連合大会)。

しかし本実験で得られたクレーター直径とHolsappleのスケーリング則から予想される直径には異なりがあった(図参照)。この違いは、高速度域と低速度域での π_2 のべきの値の違いによると考えられる(低速度域で -0.19 ; 高速度域で -0.17)。この結果は、低速度域では弾丸直径に対してクレーター直径が小さいため、衝突エネルギーが効率良くクレーター形成に消費されていることを示唆している。また、弾丸密度の影響を確かめるため、 1 G 下で直径 8 mm のガラス球(密度: 2.6 gcm^{-3})を衝突速度 $1\text{--}5 \text{ ms}^{-1}$ で衝突させた結果、 π_2 のべきの値は -0.25 であり、これはステンレス弾丸よりも効率が良いことを示す結果である。原因として、ステンレス弾丸は貫入が深かった分、衝突エネルギーの散逸が大きくなったためと考えられる。クレーター形成に消費されるエネルギーの効率は貫入深さによっても左右され得る。

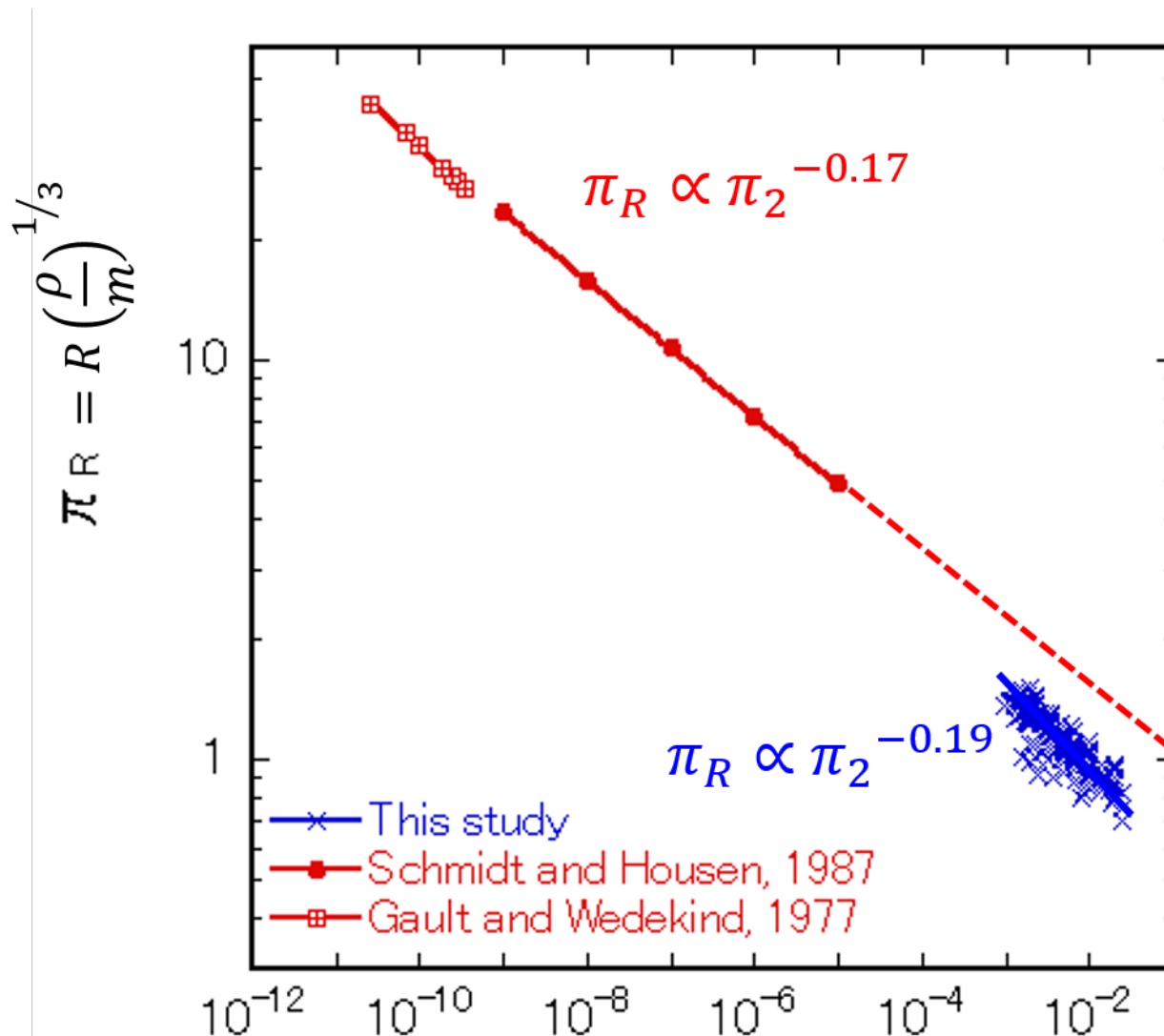
本実験で得られた結果をもとに、1次クレーターから放出されたボルダーがイトカワ表面に再落下した際に形成されるクレーターサイズを見積もった。表面画像よりdimpleに付随するボルダーはメートルサイズであり、このようなボルダーが脱出速度 0.17 ms^{-1} でsmooth terrainに衝突した場合を考える。smooth terrainでの粒子層の密度は $0.95 \sim 1.6 \text{ gcm}^{-3}$ と推定され(Kiuchi and Nakamura, 2014)、これらの条件と本実験で得られた低速度域でのスケーリング則から、例として直径 2 m のボルダーで直径 $7 \sim 8 \text{ m}$ のクレーターが形成される。衝突速度は上限値であり表層の空隙の影響は考慮していないが、 2 m のボルダーが付随しているdimple直径は 7 m 程度という観測結果と調和的である。この結果はイトカワのdimpleの成因が、ボルダーの低速度衝突である可能性を支持する。

また、フォボス表面のStickneyクレーター由来と考えられるボルダーに同様の見積もりを行ったところボルダー直径の $2 \sim 3$ 倍程度のクレーターが形成されるが、表面画像からはボルダーが付随するdimple地形は確認で

きない。これは、イトカワとフォボスの表層構造の違いや表層進化の過程の違いに原因があるのかもしれない。今後これらの要因についてのさらなる調査と考察を行い、結果を報告する。

キーワード：ディンプル、イトカワ、クレーター形成実験、フォボス

Keywords: dimple, Itokawa, impact experiments, Phobos



g : gravitational acceleration

a : impactor radius

v : impact velocity, R : crater radius

ρ : target density, m : impactor mass

$$\pi_2 = \frac{ga}{v^2}$$

地球スイングバイ時の「はやぶさ2」可視カメラが捉えた月・地球

Earth-moon images captured by Hayabusa2 visible cameras during Earth swing-by

*杉田 精司¹、山田 学²、澤田 弘崇³、諸田 智克⁴、本田 理恵⁵、亀田 真吾⁶、本田 親寿⁷、鈴木 秀彦⁸、神山 徹⁹、小川 和律¹⁰、石黒 正晃¹¹

*Seiji Sugita¹, Manabu Yamada², Hirotaka Sawada³, Tomokatsu Morota⁴, Rie Honda⁵, Shingo Kameda⁶, Chikatoshi Honda⁷, Hidehiko Suzuki⁸, Toru Kouyama⁹, Kazunori Ogawa¹⁰, MASATERU ISHIGURO¹¹

1.東京大学、2.千葉工業大学、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4.名古屋大学、5.高知大学、6.立教大学、7.会津大学、8.明治大学、9.産総研、10.神戸大学、11.ソウル大学

1.the University of Tokyo, 2.Chiba Institute of Technology, 3.JAXA, 4.Nagoya University, 5.Kochi University, 6.Rikkyo University, 7.Aizu University, 8.Meiji University, 9.AIST, 10.Kobe University, 11.Seoul National University

はやぶさ2探査機は2015年12月3日に地球スイングバイを行った。我々はこの機会に、はやぶさ2の可視カメラ（ONC-T, W1, W2）を用いて、地球と月を撮像した。得られた画像は、小惑星リュウグウに到着する前に撮像できる最後の面光源画像であるため、本カメラの性能評価をする上で非常に貴重な機上データとなる。本発表では、今回の地球スイングバイ前後の地球・月撮像の結果と予備的な解析結果を紹介する。

炭素質隕石の反射スペクトル位相角依存性と紫外分光

Phase angle dependency on reflectance spectra and ultraviolet spectroscopy of carbonaceous chondrites.

*高松 知広¹、亀田 真吾¹、杉田 精司²

*Tomohiro Takamatsu¹, Shingo Kameda¹, Seiji Sugita²

1.立教大学理学部、2.東京大学大学院理学系研究地球惑星科学専攻

1.School of Science, Rikkyo university, 2.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

2014年、C型小惑星「Ryugu」を目標天体とした小惑星探査機「はやぶさ2」が打ち上げられた。はやぶさ2におけるミッション目標の一つは、熱変成の進んでいない始原的な物質（含水鉱物）を地球へと持ち帰ることであり、Ryuguには、地上からの反射分光測定の結果[Vilas, 2008]から含水鉱物の存在を示す700nm吸収帯の存在が確認されている。はやぶさ2では、3つの可視カメラから成る光学航法カメラ（ONC）のうち7枚のバンドパスフィルタの備わった望遠カメラ「ONC-T」を用いてマルチバンド分光観測をおこなう。そしてその撮像結果から700nm吸収帯の存在する地点を特定し、着陸地点を決定する。したがってマルチバンド分光観測から700nm吸収帯の検出が可能であることを事前に確認しておくことが重要である。我々はこれまでに、ONC-Tのフライトモデルを用いて、C型小惑星に対応する反射スペクトルを持つ炭素質コンドライトに対する反射分光実験をおこない、太陽-Ryugu-はやぶさ2の位相角が30°のときに700nm吸収帯が検出可能であることを確認した[kameda et al, 2015]。しかし、はやぶさ2がRyuguへと到着し、出発するまでの2018年6月から2019年12月の期間において位相角は0°から40°の範囲で変化する。したがって、位相角30°以外においてもマルチバンド分光観測から700nm吸収帯が検出可能であることを検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、ONC-Tを模擬したカメラを用いて位相角0°から40°の範囲で炭素質コンドライトに対する反射分光実験をおこない、700nm吸収帯の深さ及び反射スペクトルの位相角依存性の測定を目指した。

本研究では、位相角が0°から40°の範囲での反射スペクトルを得るために、出射角を0°に固定し、入射角が0°から40°の範囲で可変な実験系をハーフミラーと回転ステージを用いることにより作製した。そしてその実験系で、ONC-Tで使われているCCDチップと同じものを組み込んだ模擬カメラと、ONC-Tに搭載されているバンドパスフィルタと同等の透過中心波長をもつフィルターを用いて、炭素質コンドライトの反射スペクトル及び700nm吸収帯の深さを各入射角において求めた。本発表では、その結果について報告する。

なお、本発表では、2022年に打ち上げを目指している「火星衛星探査計画」における、「紫外観測による衛星表面物質の同定に向けての検討」の経過についても併せて報告する予定である。

キーワード：太陽系小天体、分光撮像、炭素質コンドライト

Keywords: Small Solar System Bodies, Multi-band imaging, carbonaceous chondrite

宇宙風化作用における硫化鉄の効果

Effect of iron sulfide on the space weathering of asteroids

岡崎 瑞祈¹、*佐々木 晶¹、廣井 孝弘²、松本 徹³、土山 明⁴、三宅 亮⁴、平田 岳史^{3,4}Mizuki Okazaki¹, *Sho Sasaki¹, Takahiro Hiroi², Toru Matsumoto³, Akira Tsuchiyama⁴, Akira Miyake⁴, Takafumi Hirata^{3,4}

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、2.ブラウン大学地球環境惑星学部、3.宇宙科学研究所、4.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.Department of Earth and Space Sciences, School of Science, Osaka University, 2.Department of Earth, Environmental, and Planetary Sciences, 3.ISAS/JAXA, 4.Department of Earth and Planetary Science, Kyoto University

The space weathering alters surface optical properties on airless bodies such as asteroids, the Moon and Mercury. As for silicate bodies containing iron silicate, the space weathering (characterized by optical reddening, darkening and attenuation of Fe-related absorption) is caused by nanophase metallic iron (npFe⁰) particles within vapor-deposited amorphous rim by micrometeorite impacts or within amorphous rim by solar wind implantation.

However nanophase iron sulfide (npFeS) was found in Itokawa particle's space weathered rim (Noguchi et al., 2011) and was observed more frequently than npFe⁰ in regolith breccia meteorites (Noble et al., 2011). Therefore we performed experiments of pulse laser irradiation to olivine and FeS mixture samples to explain the effect of FeS on space weathering. The samples which 5, 10, 20 weight % FeS mixed to olivine of particle size 45-75 micron was made and irradiated at 10 mJ once or twice. Some of laser irradiated samples were also conducted additional thermal fatigue experiments. After laser irradiation and/or thermal fatigue experiments, reflectance spectra of samples were measured, and some of laser irradiation samples were observed by microscopes; FE-SEM, HRM, TEM and SEM-EDS.

The results show FeS promote vapor deposition type space weathering, especially overall darkening. The spectra of samples including FeS showed more reddening and also overall darkening, and also fine FeS particles are highly effective. Thermal fatigue experiments after laser irradiation show that darkening was back to standard but reddening remained. This results show that spectral change especially darkening is not stable against heating simulating asteroidal surface. Our HRM, TEM and SEM-EDS observation suggest npFeS particles exist but have not been exactly identified in this study.

Therefore, addition of FeS particles promote reddening by formatting npFe⁰ on the surface of olivine particles. The cause of darkening is not micro-scale particles but macro-scale sulfur deposition by HRM, TEM and SEM-EDS observation. Thermal fatigue experiments in this study show sulfur can easily vaporize from surface, which suggests sulfur on asteroids is less than in meteorites.

キーワード：宇宙風化作用、小惑星、硫黄、反射スペクトル

Keywords: Space weathering, asteroids, sulfur, reflectance spectrum

凍結砂を用いた強度支配域のクレータースケール則に関する実験的研究

High velocity impact experiments for frozen sands related to crater scaling laws in strength regime

高野 翔太¹、*荒川 政彦¹、保井 みなみ¹、松榮 一真¹、長谷川 直²Shota Takano¹, *Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹, Kazuma Matsue¹, Sunao Hasegawa²

1.神戸大学大学院理学研究科、2.宇宙航空研究開発機構

1.Graduate School of Science, Kobe University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

外惑星領域では、固体天体の多くは氷地殻で覆われており、その氷地殻は氷・岩石粒子混合物から構成されている。この氷地殻で観測される衝突クレーターのサイズから衝突天体のサイズを推測したり、クレータ形成時の衝突放出物（エジェクタ）が堆積してできるレゴリス層の厚さを定量的に見積もるには、クレーターのスケールリング則が必要である。特に1000km以下の氷天体では、1km以下のクレーターは、氷地殻の強度により、その形成過程が律速されている可能性が高く、これらのクレーターについて研究を進めるには、物質強度が支配する領域でのクレータースケール則が必要である。しかしながら、物質強度を連続的に変化させてこのスケール則を検証した例は非常に少なく、特に、エジェクタの速度分布に関する例は皆無と言える。そこで、本研究では、強度を連続的に変化させた試料への高速度クレータ形成実験を実施し、クレーターサイズ及びエジェクタの速度分布に対する物質強度依存性を明らかにする研究を行った。

実験では氷地殻を模擬するために水分量を調節した凍結石英砂を標的として利用している。この凍結砂試料は、粒径100 μ mの石英砂に水を2.5 wt.%から20wt.%まで加えて-20℃で凍結させて作成している。この試料の引っ張り強度（Y）を測定した所、含水量（C）との間に $Y(\text{MPa})=0.145C(\text{wt.}\%)$ の関係にあることがわかった。この標的に対して、直径2mmのアルミ弾丸を2, 4, 6km/sで標的面に垂直に衝突させてクレータ形成実験を行い、その結果を π スケールリング則を用いて整理した。その結果、すべての実験データは、規格化クレーターサイズ $\pi_R=R(\rho/m)^{1/3}$ と規格化強度 $\pi_Y=Y/\rho v_i^2$ を用いて $\pi_R=1.0\pi_Y^{-0.3}$ の式で整理できることがわかった。なお、 ρ は標的のバルク密度、 m は弾丸質量、 v_i は衝突速度である。また、エジェクタの速度分布を調べたところ、放出粒子の飛び出し角度は、放出位置が衝突点から遠くなるに従って増加し、クレーターリム近くでは90°に近い急角度になることがわかった。そして、この放出角度の連続的な変化は、ピラーと呼ばれる垂直に近い角度で成長するエジェクタカーテンを形成する原因となっていることを明らかにした。

キーワード：太陽系小天体、高速度衝突、クレータースケール則

Keywords: solar system small bodies, high velocity impact, crater scaling law

衝突貫入時の加速度計測による惑星表面の力学的性質の調査

The survey of physical properties of planetary subsurface using penetrator

*岡崎 昌志¹、荒川 政彦¹、保井 みなみ¹、松榮 一真¹、高野 翔太¹*Masashi Okazaki¹, Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹, Kazuma Matsue¹, Shota Takano¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：

天体表層で一般的な衝突現象では、クレーター形成に伴い表層の圧密・破壊・エジェクタ堆積が起こる。衝突を受けていない表層と比較すると圧密層では密度が大きくなり、破壊が起きた層では強度が低下、エジェクタ堆積層は空隙率が高くなることが考えられる。つまり天体表層の力学的性質（密度・強度・空隙率）を知ることにより天体表層で起きた様々な現象についての重要な手がかりを得ることができる。

本研究では天体表層探査の一つであるペネトレータ探査に着目した。これは加速度計・熱流量計・温度計などの観測機器を内部に搭載した槍状のペネトレータを惑星表面に貫入させるといった探査である。探査機や地上からのリモート観測とは違い、ペネトレータを直接天体へ潜り込ませることで直接測定が可能である。この探査において加速度計は、貫入時に天体表層物質によって生じる抵抗力を加速度として計測する。天体表層物質（種類・状態・構造）によって物質が貫入する際の抵抗力がことなるため、加速度計が計測する加速度波形が異なることが考えられる。そのため、ペネトレータ探査によって表層物質の力学的性質を特定するためには、表層物質と貫入時の加速度の関係を明らかにする必要がある。そこで、本研究ではペネトレータ探査の基礎研究として、標的物質と貫入時の加速度の関係を明らかにすることを目標にした。

実験方法：

本実験では、直径 2.6cm、高さ 4.35cm、密度 2.8g/cm³の円筒形ステンレス上部に応答周波数10kHzの加速度計を設置したペネトレータ模擬物を作成し、衝突速度1.5 - 3.8 m/sで様々な標的へ自由落下させる。標的は15x15x15cmの亚克力容器へ充填し表面を平らにならした。標的には粒子直径・粒子形状・空隙率がそれぞれ異なる粉粒体を十種類用いた：ガラスビーズ（0.5 μm, 100 μm, 200 μm, 500 μm, 1 mm, 1 cm）、石英砂（100 μm, 500 μm）、赤玉（2 - 4 mm）、パーライト（2 - 3 mm） 衝突後に受ける加速度の時間変化を記録し、衝突速度・粒子直径・粒子形状・空隙率による加速度の変化を調べた。

結果：

得られた加速度波形を次の要素（衝突時の加速度、静止直前の加速度、継続時間）を用いて解析を行った。これらより定量的に加速度と力学的性質の関係を導くことができた。

また、これらの要素を用いて波形を分類することで、表層物質の制約に関する手がかりを得た。

キーワード：ペネトレータ、物理的性質、表面下

Keywords: penetrator, physical property, subsurface

54Cr Isotopic Anomalies in Asteroids Caused by Injection and Diffusion in Solar Nebula

54Cr Isotopic Anomalies in Asteroids Caused by Injection and Diffusion in Solar Nebula

*中本 泰史¹、竹石 陽¹

*Taishi Nakamoto¹, Akira Takeishi¹

1.東京工業大学

1.Tokyo Institute of Technology

Temporal change of ⁵⁴Cr isotopic ratio in meteorites:

Chromium has four stable isotopes: their mass numbers are 50, 52, 53, and 54. The ratio of ⁵⁴Cr to the major isotope ⁵²Cr in various meteorites including chondrites, differentiated meteorites, and iron meteorites shows variations (anomalies). Sugiura and Fujiya (2014) estimated formation ages of each meteorite parent body and found that ages of meteorite parent bodies and the degree of ⁵⁴Cr isotopic anomalies in the meteorites are in a good correlation. They thought that this relation is caused by an increase of ⁵⁴Cr-rich particles contained in meteorites. Based on this interpretation, they carried out numerical simulations, in which small ⁵⁴Cr-rich dust particles are injected into the solar nebula at a certain time and diffuse in the nebula, and showed that the correlation can be reproduced by the small grain injection model.

Injection Model Revisited:

Although the Sugiura and Fujiya model is interesting and attractive, we think some points should be reconsidered. First, they assumed that small dust particles from a supernova arrive only at a narrow ring area on the disk at a certain distance from the central star. However, the injection to such a narrow ring seems unrealistic. Secondly, they supposed that the solar nebula is static. The solar nebula evolves in the time scale not much different from the time scale of parent body formation. Thus, we examine the concentration of ⁵⁴Cr-rich dust particles in the solar nebula as a function of time with a uniform injection model. The solar nebula dynamical evolution is also taken into consideration.

Results:

We obtained results that the concentration of ⁵⁴Cr-rich grains in the meteorite parent body formation region increases as the time. The surface density of the solar nebula decreases with radial distance, and we suppose that the material is injected uniformly, then after the injection, the concentration of ⁵⁴Cr-rich small grains per unit disk area becomes an increasing function of the radial distance. Since the meteorite parent body formation region is rather close to the Sun, e.g., 2 - 4 AU, the concentration in that region is initially low. On the other hand, diffusive motion of small grains in the solar nebula is caused by turbulence, and the mass flux due to the diffusion is in proportion to the gradient of the concentration. So, the distribution of concentration approaches a flat one with time. Thus, the concentration in the meteorite parent body formation region increases with time.

According to our numerical simulations, the quantitative relation between the ⁵⁴Cr anomalies and the parent body ages obtained by Sugiura and Fujiya (2014) can be reproduced when the turbulent diffusivity parameter a , which is a model parameter representing the strength of turbulence in the disk, is of the order of 10^{-3} - 10^{-2} .

キーワード: Isotopic Anomaly、Solar Nebula、54Cr、Meteorite Parent Body Formation、Injection

Keywords: Isotopic Anomaly, Solar Nebula, 54Cr, Meteorite Parent Body Formation, Injection

ペルセウス座流星群の4次元予報計算

4-D calculation of prediction of Perseid

*佐藤 勲¹、今村 優志¹、阿部 新助¹*Isao Sato¹, Yushi Imamura¹, Shinsuke Abe¹

1. 日本大学

1. Nihon University

現在のダストトレール理論による流星群の出現予報では、流星物質が近日点で軌道進行方向に放出されるという仮定して計算されている。しかし、実際に地球に降ってくる流星物質は、近日点で放出されたものではないことがわかっている。本研究では、母天体の任意の軌道上において3次元速度ベクトルで放出された流星物質の軌道を計算し、実際にいつどこで放出された物質が地球に降ってくるのかを明らかにする。

キーワード：流星、4次元予報計算、ペルセウス座流星群

Keywords: meteor, 4-D calculation, perseid

日本人が発見した2重小惑星

Possible duplicity of some asteroids discovered in Japan

*佐藤 勲¹、浜野和 博巳、富岡 啓行、上原 貞治、土川 啓

*Isao Sato¹, hamanowa Hiromi, Tomioka Hiroyuki, Uehara Sadaharu, Tsuchikawa Akira

1. 日本大学

1. Nihon University

日本人が発見した2重小惑星と考えられる小惑星、(279)Thule, (324)Bamberga, (624)Hektor, (657)Gunlod, (3220)Murayamaについて発表する。

キーワード：小惑星、衛星

Keywords: asteroid , satellite

アブダクションによるマルチインパクト仮説で何が得られるか? 「太陽系と小惑星帯」起源の謎に迫る!

What can be obtained in Mult Impact Hypothesis by Abduction? Approaching the mystery of Origin of "Solar system and Asteroid belt"!

*種子 彰¹

*Akira Taneko¹

1.SEED SCIENCE Lab.

1.SEED SCIENCE Lab.

月や小惑星の起源は、未解決のままである。

地球から距離があり、生物誕生以前の過去であり、更に実験も不可能だ。

隕石調査で解明できるが、資料入手が稀であり、落下時の燃焼による熱履歴が起源解析を困難にした。

分化した隕石(石質、鉄、石鉄隕石)と未分化の隕石が有ることが説明できない。

アブダクションによって「マルチインパクト仮説」で何を求めることができますか?

「太陽系と小惑星帯」の起源の謎に迫ります!

アブダクションの有効性は、「物理的に意味が有る仮説」の選択で全てが決定される。

「複数の結論が現状を相互に矛盾なく系統的に説明できること」がその証明となる。

「マルチインパクト仮説」は、(A)と(B)の仮説と以下の「月と地球のミッシングリンクを繋ぐ」統一的な推論を得た。

(A)太陽系の小惑星帯位置に形成された火星サイズの分化した原始惑星CERRAが、その直近の木星(巨大質量)の摂動により、

軌道が木星近点側に偏平化する。

(B)そのCERRAが木星衝突する直前に、木星と太陽の張力で断裂し、そのマントル片が地球軌道と交差しており地球と衝突する。

アブダクションによる<結論>

(1)月の起源 : マントル片が地球に衝突(12.4km/s, 36.5度)し、軌道半径60・Re位置に形成

* (2)環太平洋弧状列島縁海起源 : 月形成時の太平洋位置衝突では、全方向へ凹縁海形成

* (3)月形成衝突で大量のマントル欠損により、コア偏芯(約10%)のブラジルのバンアレン帯が低下。

* (4)CERRAが木星摂動で軌道偏平し断裂するまで約5~6億年掛かり、既に分化冷却していた。

* (5)地球へ複数のマントル片が衝突して、マントル剥離しアイソスタシーで-5kmの地球表面の70%海が形成した。

* (6)プレートテクトニクスPTの起源, 駆動力は衝突による偏芯と慣性モーメントの最小化である

* (7)プレート境界の起源 : マントル片衝突による地殻剥離と亀裂形成

* (8)弧状列島と縁海盆凹プレートの起源 : 衝突によるマントル欠損とアイソスタシーでプレート凹形成

* (9)凸プレート沈み込み開始の起源 : その駆動力で凹プレートと凸プレートが押し合うと凹の下に凸が潜り込む原因となる。

(10)CERRAの断裂時の破片は小惑星帯の起源である。長半径(運動エネルギー)の分布で理解

(11)隕石には、分化した石質・石鉄・鉄隕石が混在しているがそれはCERRAの破片と理解できる。

(12)CERRAの破片は複数あり、順次衝突して度重なる生物絶滅が起きた。

(13)セラのコアとマントルの一部は質量が大きい為に速度が低下し、エネルギー等分配の法則により軌道エネルギーの低い水星(多くの割合をコアが占める)となった。

(14)CERRAの破片が木星へ衝突した事が、大赤斑の起源となった。

cf. シューメーカーレビ9号彗星が1997年7月に木星に衝突し、衝突痕は小赤斑として約半年間残った。

彗星より大きいセラの破片なら、数億年前から消えることなく大赤斑を維持できる。これで実証実験が済んだのか?

小惑星帯の起源を推定することで、サンプルリターン計画で何を解明するかの目的が明確となる。

キーワード：小惑星帯起源の謎、アブダクション、マルチインパクト仮説、小惑星の起源、分化した隕石の起源、未分化の隕石の起源

Keywords: the mystery of Origin of " Asteroid belt", Abduction, Multi-Impact Hypothesis, The origin of Asteroid, Origin of differentiated Meteorites, Undifferentiated Meteorite, Chondrite

