

Thermal Infrared Imager TIR on Hayabusa2 and Its In-Flight Performance using Earth-Moon Thermal Images.

Thermal Infrared Imager TIR on Hayabusa2 and Its In-Flight Performance using Earth-Moon Thermal Images.

\*岡田 達明<sup>1,9</sup>、福原 哲哉<sup>2</sup>、田中 智<sup>1,9</sup>、田口 真<sup>3</sup>、今村 剛<sup>1,9</sup>、荒井 武彦<sup>8</sup>、千秋 博紀<sup>4</sup>、小川 佳子<sup>5</sup>、出村 裕英<sup>5</sup>、北里 宏平<sup>5</sup>、中村 良介<sup>6</sup>、神山 徹<sup>6</sup>、関口 朋彦<sup>7</sup>、長谷川 直<sup>1</sup>、松永 恒雄<sup>8</sup>、和田 武彦<sup>1</sup>、滝田 隼<sup>9</sup>、坂谷 直哉<sup>1</sup>、堀川 大和<sup>10</sup>、遠藤 憲<sup>5</sup>、ヘルバート ヨルン<sup>11</sup>、ミュラー トマス<sup>12</sup>、ハゲルマン アクセル<sup>13</sup>

\*Tatsuaki Okada<sup>1,9</sup>, Tetsuya Fukuhara<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>1,9</sup>, Makoto Taguchi<sup>3</sup>, Takeshi Imamura<sup>1,9</sup>, Takehiko Arai<sup>8</sup>, Hiroki Senshu<sup>4</sup>, Yoshiko Ogawa<sup>5</sup>, Hirohide Demura<sup>5</sup>, Kohei Kitazato<sup>5</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>6</sup>, Toru Kouyama<sup>6</sup>, Tomohiko Sekiguchi<sup>7</sup>, Sunao Hasegawa<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>8</sup>, Takehiko Wada<sup>1</sup>, Jun Takita<sup>9</sup>, Naoya Sakatani<sup>1</sup>, Yamato Horikawa<sup>10</sup>, Ken Endo<sup>5</sup>, Joern Helbert<sup>11</sup>, Thomas G. Mueller<sup>12</sup>, Axel Hagermann<sup>13</sup>

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  $328 \times 248$  effective pixels, with IFOV of  $0.051^\circ$  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 ( $0.05^\circ$  or  $0.10^\circ$ ) 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<sup>1</sup>、平田 成<sup>1</sup>、上野 航<sup>1</sup>、出村 裕英<sup>1</sup>、荒井 武彦<sup>2</sup>、岡田 達明<sup>3</sup>、田中 智<sup>4</sup>\*Ken Endo<sup>1</sup>, Naru Hirata<sup>1</sup>, Wataru Ueno<sup>1</sup>, Hirohide Demura<sup>1</sup>, Takehiko Arai<sup>2</sup>, Tatsuaki Okada<sup>3</sup>, Satoshi Tanaka<sup>4</sup>

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](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<sup>1</sup>、安部 正真<sup>1</sup>、岡田 達明<sup>1</sup>、塚本 尚義<sup>3</sup>、上棺 真之<sup>1</sup>、唐牛 譲<sup>1</sup>、中藤 亜衣子<sup>1</sup>、橋口 未奈子<sup>1</sup>、松本 徹<sup>1</sup>、西村 征洋<sup>2</sup>、熊谷 和也<sup>1</sup>、松井 重雄<sup>1</sup>、藤本 正樹<sup>1</sup>

\*Toru Yada<sup>1</sup>, Masanao Abe<sup>1</sup>, Tatsuaki Okada<sup>1</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>3</sup>, Masayuki Uesugi<sup>1</sup>, Yuzuru Karouji<sup>1</sup>, Aiko Nakato<sup>1</sup>, Minako Hashiguchi<sup>1</sup>, Toru Matsumoto<sup>1</sup>, Masahiro Nishimura<sup>2</sup>, Kazuya Kumagai<sup>1</sup>, Shigeo Matsui<sup>1</sup>, Masaki Fujimoto<sup>1</sup>

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<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar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]。仕様検討委員会では、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<sup>1</sup>、藪田 ひかる<sup>2</sup>、小松 睦美<sup>3</sup>、諸田 智克<sup>4</sup>、松岡 萌<sup>5</sup>、杉田 精司<sup>6</sup>、廣井 孝弘<sup>7</sup>、北里 宏平<sup>8</sup>、岡田 達明<sup>1</sup>、千秋 博紀<sup>9</sup>、佐々木 晶<sup>2</sup>、中村 智樹<sup>4</sup>、小林 直樹<sup>1</sup>、渡邊 誠一郎<sup>5</sup>、はやぶさ2 着陸地点検討ワーキンググループ

\*Aiko Nakato<sup>1</sup>, Hikaru Yabuta<sup>2</sup>, Mutsumi Komatsu<sup>3</sup>, Tomokatsu Morota<sup>4</sup>, Moe Matsuoka<sup>5</sup>, Seiji Sugita<sup>6</sup>, Takaaki Hiroi<sup>7</sup>, Kohei Kitazato<sup>8</sup>, Tatsuaki Okada<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>9</sup>, Sho Sasaki<sup>2</sup>, Tomoki Nakamura<sup>4</sup>, Naoki Kobayashi<sup>1</sup>, Seiichiro Watanabe<sup>5</sup>, 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<sup>1</sup>、山田 学<sup>2</sup>、澤田 弘崇<sup>3</sup>、諸田 智克<sup>4</sup>、本田 理恵<sup>5</sup>、亀田 真吾<sup>6</sup>、本田 親寿<sup>7</sup>、鈴木 秀彦<sup>8</sup>、神山 徹<sup>9</sup>、小川 和律<sup>10</sup>、石黒 正晃<sup>11</sup>

\*Seiji Sugita<sup>1</sup>, Manabu Yamada<sup>2</sup>, Hirotaka Sawada<sup>3</sup>, Tomokatsu Morota<sup>4</sup>, Rie Honda<sup>5</sup>, Shingo Kameda<sup>6</sup>, Chikatoshi Honda<sup>7</sup>, Hidehiko Suzuki<sup>8</sup>, Toru Kouyama<sup>9</sup>, Kazunori Ogawa<sup>10</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>11</sup>

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<sup>1</sup>、佐々木 晶<sup>1</sup>\*Masanori Kanamaru<sup>1</sup>, Sho Sasaki<sup>1</sup>

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/cm<sup>3</sup> (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

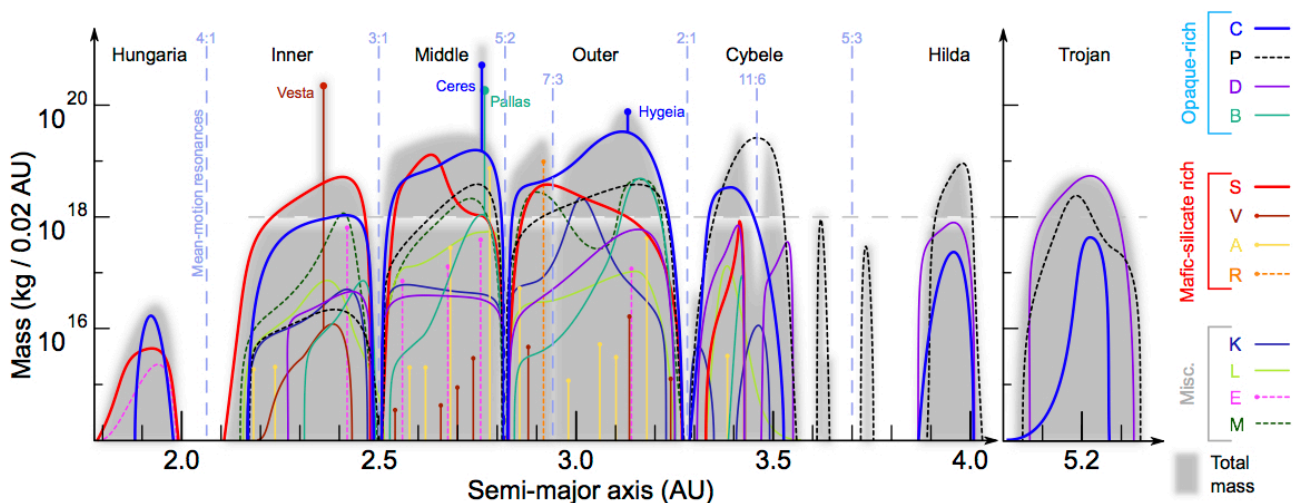
## Asteroids as Records of Solar System History

\*Francesca Eleanora DeMeo<sup>1</sup>, Benoit Carry<sup>2</sup>, David Polishook<sup>3</sup>, Brian Burt<sup>1</sup>, Richard Binzel<sup>1</sup>, Nicholas Moskovitz<sup>4</sup>

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<sub>2</sub> gas pressure\*藤谷 渉<sup>1</sup>\*Wataru Fujiya<sup>1</sup>

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<sub>2</sub> produced by the reactions were not taken into account.

Here I present a model on fluid flow in hydrous asteroids considering H<sub>2</sub> gas generated by oxidation of metallic iron. Since H<sub>2</sub> 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 <sup>26</sup>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 <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al ratio of 3.7 x 10<sup>-6</sup>. 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<sub>2</sub> gas until metallic iron is completely oxidized.

The results of the simulation suggest that fluid (H<sub>2</sub> 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<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>1</sup>\*Tomomi Omura<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1</sup>

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  $\mu m$ 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 $10^4$ - $2 \times 10^6$  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、 $10^4$ - $2 \times 10^6$  Paの圧力範囲において試料の空隙率は $\sim 0.7$ 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<sup>1,2</sup>, ISHIGURO MASATERU<sup>1</sup>, Usui Fumihiko<sup>3</sup>

\*Yoonsoo Bach Park<sup>1,2</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>1</sup>, Fumihiko Usui<sup>3</sup>

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 Kwon<sup>1</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>1</sup>, Hidekazu Hanayama<sup>2</sup>, Daisuke Kuroda<sup>3</sup>, Satoshi Honda<sup>4</sup>, Jun Takahashi<sup>4</sup>, Yoonyoung Kim<sup>1</sup>, Myung Gyoon Lee<sup>1</sup>, Young-Jun Choi<sup>5</sup>, Myung-Jin Kim<sup>5</sup>, Jeremie Vaubaillon<sup>6</sup>, Takeshi Miyaji<sup>2</sup>, Kenshi Yanagisawa<sup>3</sup>, Michitoshi Yoshida<sup>7</sup>, Kouji Ohta<sup>8</sup>, Nobuyuki Kawai<sup>9</sup>, Hideo Fukushima<sup>10</sup>, Jun-ichi Watanabe<sup>10</sup>

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<sup>1</sup>、荒井 朋子<sup>2</sup>、岩田 隆浩<sup>1</sup>、岡田 達明<sup>1</sup>、船瀬 龍<sup>3</sup>

\*Yasuhiro Kawakatsu<sup>1</sup>, Tomoko Arai<sup>2</sup>, Takahiro Iwata<sup>1</sup>, Tatsuaki Okada<sup>1</sup>, Ryu Funase<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>、小林 正規<sup>1</sup>、千秋 博紀<sup>1</sup>、和田 浩二<sup>1</sup>、石橋 高<sup>1</sup>、春日 敏測<sup>1</sup>、山田 学<sup>1</sup>、亀田 真吾<sup>13</sup>、大塚 勝仁<sup>3</sup>、渡部 潤一<sup>2</sup>、伊藤 孝士<sup>2</sup>、川勝 康弘<sup>4</sup>、Sarli Bruno<sup>4</sup>、岩田 隆浩<sup>4</sup>、岡田 達明<sup>4</sup>、吉川 真<sup>4</sup>、中村 智樹<sup>6</sup>、藪田 ひかる<sup>5</sup>、佐々木 晶<sup>5</sup>、小松 睦美<sup>7</sup>、中藤 亜衣子<sup>4</sup>、廣井 孝弘<sup>8</sup>、三河内 岳<sup>9</sup>、浦川 聖太郎<sup>10</sup>、阿部 新助<sup>11</sup>、石黒 正晃<sup>12</sup>、木村 宏<sup>14</sup>、橘 省吾<sup>15</sup>、中村 良介<sup>16</sup>、中村メッセンジャー 圭子<sup>17</sup>、佐藤 幹哉<sup>20</sup>、Srama Ralf<sup>18</sup>、Kruger Harald<sup>19</sup>

\*Tomoko Arai<sup>1</sup>, Masanori Kobayashi<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Ko Ishibashi<sup>1</sup>, Toshihiro Kasuga<sup>1</sup>, Manabu Yamada<sup>1</sup>, Shingo Kameda<sup>13</sup>, Katsuhito Ohtsuka<sup>3</sup>, Jun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Takashi Ito<sup>2</sup>, Yasuhiro Kawakatsu<sup>4</sup>, Sarli Bruno<sup>4</sup>, Takahiro Iwata<sup>4</sup>, Tatsuaki Okada<sup>4</sup>, Makoto Yoshikawa<sup>4</sup>, Tomoki Nakamura<sup>6</sup>, Hikaru Yabuta<sup>5</sup>, Sho Sasaki<sup>5</sup>, Mutsumi Komatsu<sup>7</sup>, Aiko Nakato<sup>4</sup>, Takahiro Hiroi<sup>8</sup>, Takashi Mikouchi<sup>9</sup>, Seitaro Urakawa<sup>10</sup>, Shinsuke Abe<sup>11</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>12</sup>, Hiroshi Kimura<sup>14</sup>, Shogo Tachibana<sup>15</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>16</sup>, Keiko Nakamura-Messenger<sup>17</sup>, Mikiya Sato<sup>20</sup>, Ralf Srama<sup>18</sup>, Harald Kruger<sup>19</sup>

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<sup>1</sup>、小林 浩<sup>2</sup>、竹内 拓

\*Takahiro Ueda<sup>1</sup>, Hiroshi Kobayashi<sup>2</sup>, 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 $\mu$ m and 3.0% in band at 18 $\mu$ 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  $\beta$  which represents the strength of the radiation force compared to the gravitational force from the Sun. The parameter  $\beta$  can be defined as a function of dust properties such as dust radius  $s$  and material density  $\rho$ . In our calculations, particles are set to be 0.001-0.1 in  $\beta$  (corresponding to 3-300 $\mu$ 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 $\mu$ 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 Yang<sup>1</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>\*Masaki Fujimoto<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、小郷原 一智<sup>2</sup>、笠羽 康正<sup>3</sup>、青木 翔平<sup>6</sup>、田口 真<sup>4</sup>、亀田 真吾<sup>4</sup>、吉川 一朗<sup>5</sup>

\*Takeshi Imamura<sup>1</sup>, Kazunori Ogohara<sup>2</sup>, Yasumasa Kasaba<sup>3</sup>, Shohei Aoki<sup>6</sup>, Makoto Taguchi<sup>4</sup>, Shingo Kameda<sup>4</sup>, Ichiro Yoshikawa<sup>5</sup>

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、観測の手がかりがない (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分光・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<sup>1</sup>、新谷 昌人<sup>2</sup>、松本 晃治<sup>3</sup>、寺田 直樹<sup>4</sup>、西堀 俊幸<sup>5</sup>、菊地 紘<sup>1</sup>、逸見 良道<sup>1</sup>、新原 隆史<sup>1</sup>、田中 宏幸<sup>2</sup>、小川 和律<sup>6</sup>

\*Hideaki Miyamoto<sup>1</sup>, Akito Araya<sup>2</sup>, Koji Matsumoto<sup>3</sup>, Naoki Terada<sup>4</sup>, Toshiyuki Nishibori<sup>5</sup>, Hiroshi Kikuchi<sup>1</sup>, Ryodo Hemmi<sup>1</sup>, Takafumi Niihara<sup>1</sup>, Hiroyuki Tanaka<sup>2</sup>, Kazunori Ogawa<sup>6</sup>

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<sup>1</sup>、黒澤 耕介<sup>1</sup>、玄田 英典<sup>2</sup>、長谷川 直<sup>3</sup>、鈴木 絢子<sup>3</sup>、和田 浩二<sup>1</sup>、松井 孝典<sup>1</sup>

\*Takaya Okamoto<sup>1</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>1</sup>, Hidenori Genda<sup>2</sup>, Sunao Hasegawa<sup>3</sup>, Ayako Suzuki<sup>3</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Takafumi Matsui<sup>1</sup>

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ことが必要である。

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<sup>-1</sup>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<sup>-1</sup>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。

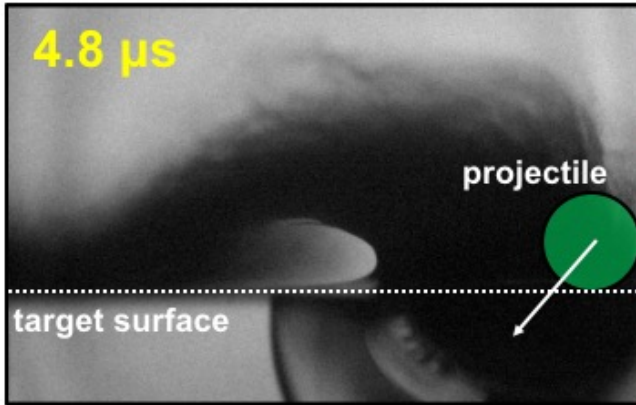
3次元SPHコード(e.g. Genda 2012)を用いて衝突シミュレーションを行った。弾丸には10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>, 10<sup>6</sup>個のSPH粒子を用いて、空間解像度の影響がイジェクタの振る舞いに与える影響を調べた。

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。一つは標的表面上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上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10<sup>6</sup>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上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。

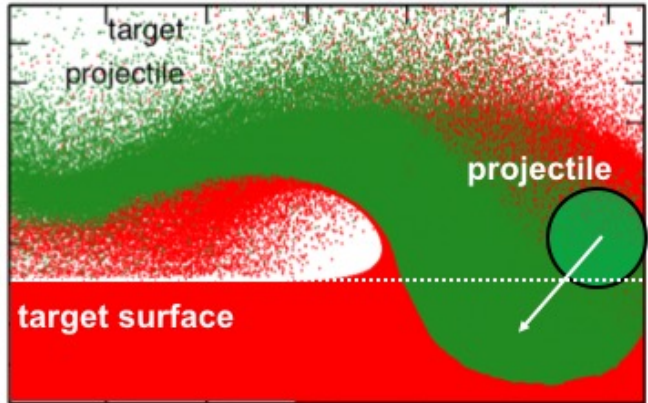
キーワード：イジェクタ、高速度衝突実験、SPHシミュレーション

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

**Original image**



**SPH 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<sup>1</sup>、関 華奈子<sup>2</sup>、二穴 喜文<sup>3</sup>、Leblanc Francois<sup>4</sup>、横田 勝一郎<sup>5</sup>、斎藤 義文<sup>5</sup>、松岡 彩子<sup>5</sup>、野村 麗子<sup>5</sup>、山崎 敦<sup>5</sup>、栗原 純一<sup>6</sup>、三浦 弥生<sup>7</sup>、馬上 謙一<sup>6</sup>、岡崎 隆司<sup>8</sup>、中村 智樹<sup>1</sup>、亀田 真吾<sup>9</sup>、長 勇一郎<sup>9</sup>、火星衛星探査計画 科学検討チーム

\*Naoki Terada<sup>1</sup>, Kanako Seki<sup>2</sup>, Yoshifumi Futaana<sup>3</sup>, Francois Leblanc<sup>4</sup>, Shoichiro Yokota<sup>5</sup>, Yoshifumi Saito<sup>5</sup>, Ayako Matsuoka<sup>5</sup>, Reiko Nomura<sup>5</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>5</sup>, Junichi Kurihara<sup>6</sup>, Yayoi N. Miura<sup>7</sup>, Ken-ichi Bajo<sup>6</sup>, Ryuji Okazaki<sup>8</sup>, Tomoki Nakamura<sup>1</sup>, Shingo Kameda<sup>9</sup>, Yuichiro Cho<sup>9</sup>, 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<sup>1</sup>、長岡 央<sup>1</sup>、吉田 康平<sup>1</sup>、石井 隼也<sup>1</sup>、青木 大輔<sup>1</sup>、草野 広樹<sup>2</sup>、長谷部 信行<sup>1,2</sup>

\*Masayuki Naito<sup>1</sup>, Hiroshi Nagaoka<sup>1</sup>, Kouhei Yoshida<sup>1</sup>, Junya Ishii<sup>1</sup>, Daisuke Aoki<sup>1</sup>, Hiroki Kusano<sup>2</sup>, Nobuyuki Hasebe<sup>1,2</sup>

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<sup>1</sup>、兵頭 龍樹<sup>2,3</sup>、Charnoz Sebastien<sup>3</sup>、Rosenblatt Pascal<sup>4</sup>

\*Hidenori Genda<sup>1</sup>, Ryuki Hyodo<sup>2,3</sup>, Sebastien Charnoz<sup>3</sup>, Pascal Rosenblatt<sup>4</sup>

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