

## 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<sup>1</sup>、岩田 隆浩<sup>2</sup>、中村 智樹<sup>4</sup>、笠羽 康正<sup>4</sup>、田口 真<sup>5</sup>、中川 広務<sup>4</sup>、鍵谷 将人<sup>1</sup>、山崎 敦<sup>2</sup>、青木 翔平<sup>3</sup>、佐藤 隆雄<sup>2</sup>

\*Takeshi Sakanoi<sup>1</sup>, Takahiro Iwata<sup>2</sup>, Tomoki Nakamura<sup>4</sup>, Yasumasa Kasaba<sup>4</sup>, Makoto Taguchi<sup>5</sup>, Hiromu Nakagawa<sup>4</sup>, Masato Kagitani<sup>1</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>2</sup>, Shohei Aoki<sup>3</sup>, Takao M. Sato<sup>2</sup>

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  $\mu\text{m}$ , hydrated minerals at 3.0–3.2  $\mu\text{m}$ , and organics at 3.4–3.4  $\mu\text{m}$ ) and dynamics in Martian atmosphere (e.g. H<sub>2</sub>O at 2.5–2.65  $\mu\text{m}$ , and pressure with CO<sub>2</sub> absorption at 1.2–2.2  $\mu\text{m}$ ). 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 1km. 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  $\mu\text{m}$  (1<sup>st</sup> order) filter on a half part of the slit, and 1.9–3.8  $\mu\text{m}$  (2<sup>nd</sup> 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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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<sup>1</sup>、澤田 弘崇<sup>2</sup>、小川 和律<sup>3</sup>、白井 慶<sup>2</sup>、坂谷 尚哉<sup>2</sup>、石橋 高<sup>1</sup>、本田 理恵<sup>4</sup>、保井 みなみ<sup>3</sup>、荒川 政彦<sup>3</sup>

\*Koji Wada<sup>1</sup>, Hirotaka Sawada<sup>2</sup>, Kazunori Ogawa<sup>3</sup>, Kei Shirai<sup>2</sup>, Naoya Sakatani<sup>2</sup>, Ko Ishibashi<sup>1</sup>, Rie Honda<sup>4</sup>, Minami Yasui<sup>3</sup>, Masahiko Arakawa<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>、田中 智<sup>2</sup>、坂谷 尚哉<sup>2</sup>、上野 宗孝<sup>1,2</sup>、星野 健<sup>2</sup>、坂本 和敏<sup>2</sup>、川村 太一<sup>3</sup>、石原 吉明<sup>2</sup>、竹内 希<sup>4</sup>、Philippe Lognonné<sup>3</sup>、新谷 昌人<sup>4</sup>、山田 竜平<sup>5</sup>、辻 健<sup>6</sup>、小林 泰三<sup>7</sup>、白井 慶<sup>8</sup>、Matthias Grott<sup>9</sup>、Jerzy Grygorczuk<sup>10</sup>、Axel Hagermann<sup>11</sup>、Jörg Knollenberg<sup>9</sup>、Tilman Spohn<sup>9</sup>、宮本 英昭<sup>4</sup>、桂木 洋光<sup>12</sup>、城野 信一<sup>12</sup>、諸田 智克<sup>12</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>

\*Kazunori Ogawa<sup>1</sup>, Satoshi Tanaka<sup>2</sup>, Naoya Sakatani<sup>2</sup>, Munetaka Ueno<sup>1,2</sup>, Takeshi Hoshino<sup>2</sup>, Kazutoshi Sakamoto<sup>2</sup>, Taichi Kawamura<sup>3</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>2</sup>, Nozomu Takeuchi<sup>4</sup>, Philippe Lognonné<sup>3</sup>, Akito Araya<sup>4</sup>, Ryuhei Yamada<sup>5</sup>, Takeshi Tsuji<sup>6</sup>, Taizo Kobayashi<sup>7</sup>, Kei Shirai<sup>8</sup>, Matthias Grott<sup>9</sup>, Jerzy Grygorczuk<sup>10</sup>, Axel Hagermann<sup>11</sup>, Jörg Knollenberg<sup>9</sup>, Tilman Spohn<sup>9</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>4</sup>, Hiroaki Katsuragi<sup>12</sup>, Sin-iti Shirono<sup>12</sup>, Tomokatsu Morota<sup>12</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、池田 人<sup>2</sup>\*Koji Matsumoto<sup>1</sup>, Hitoshi Ikeda<sup>2</sup>

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  $1.09 \pm 0.01$  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  $1.86 \pm 0.013$  g/cm<sup>3</sup> [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/m<sup>3</sup>, and about 9% when rock density is 2100 kg/m<sup>3</sup>.

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<sup>1</sup>、諸田 智克<sup>1</sup>、渡邊 誠一郎<sup>1</sup>\*Seiya Morita<sup>1</sup>, Tomokatsu Morota<sup>1</sup>, Sei-ichiro Watanabe<sup>1</sup>

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ると考えられる。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<sup>1</sup>、宮本 英昭<sup>1</sup>、逸見 良道<sup>1</sup>

\*Hiroshi Kikuchi<sup>1</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>1</sup>, Ryodo Hemmi<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>\*Yasunori Miura<sup>1</sup>

1.客員（山口市、国内外大学）

1.Visiting (Yamaguchi, In &amp; 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。

レーザーによる溶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溶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 Park<sup>1</sup>

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. Park<sup>1</sup>, A.S. Konopliv<sup>1</sup>, B.G. Bills<sup>1</sup>, N. Rambaux<sup>2</sup>, J.C. Castillo-Rogez<sup>1</sup>, C.A. Raymond<sup>1</sup>, A.T. Vaughan<sup>1</sup>, A. Ermakov<sup>3</sup>, M.T. Zuber<sup>3</sup>, R. Fu<sup>4</sup>, M.J. Toplis<sup>5</sup>, C.T. Russell<sup>6</sup>, <sup>1</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA (e-mail Ryan.S.Park@jpl.nasa.gov); <sup>2</sup>IMCCE, Observatoire de Paris, Paris, France; <sup>3</sup>Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA; <sup>4</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, USA; <sup>5</sup>University of Toulouse, Toulouse, France; <sup>6</sup>UCLA, 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  $\sim 280 \text{ km}$  with corresponding average thickness of the outer shell of  $\sim 190 \text{ km}$  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<sup>1</sup>、千秋 博紀<sup>2</sup>、並木 則行<sup>1</sup>、水野 貴秀<sup>3</sup>、阿部 新助<sup>4</sup>、吉田 二美<sup>1</sup>、浅利 一善<sup>1</sup>、野田 寛大<sup>1</sup>、平田 成<sup>5</sup>、押上 祥子<sup>1</sup>、荒木 博志<sup>1</sup>、石原 吉明<sup>3</sup>、松本 晃治<sup>1</sup>

\*Ryuhei Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>2</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Takahide Mizuno<sup>3</sup>, Shinsuke Abe<sup>4</sup>, Fumi Yoshida<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>1</sup>, Hirotomoto Noda<sup>1</sup>, Naru Hirata<sup>5</sup>, Shoko Oshigami<sup>1</sup>, Hiroshi Araki<sup>1</sup>, Yoshiaki Ishihara<sup>3</sup>, Koji Matsumoto<sup>1</sup>

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、ビームスプリッターを使用して1.064 $\mu$ 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<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>1</sup>

\*Masato Kiuchi<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

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 ( $0.17 \text{ ms}^{-1}$ ) 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 $\sim 140 \mu\text{m}$ )に直径8 mmのステンレス球(密度: $7.9 \text{ gcm}^{-3}$ )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 $-0.19 \pm 0.01$ 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 $\pi_2$ 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、 $1 \text{ G}$ 下で直径8 mmのガラス球(密度: $2.6 \text{ gcm}^{-3}$ )を衝突速度 $1\text{--}5 \text{ ms}^{-1}$ で衝突させた結果、 $\pi_2$ 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。

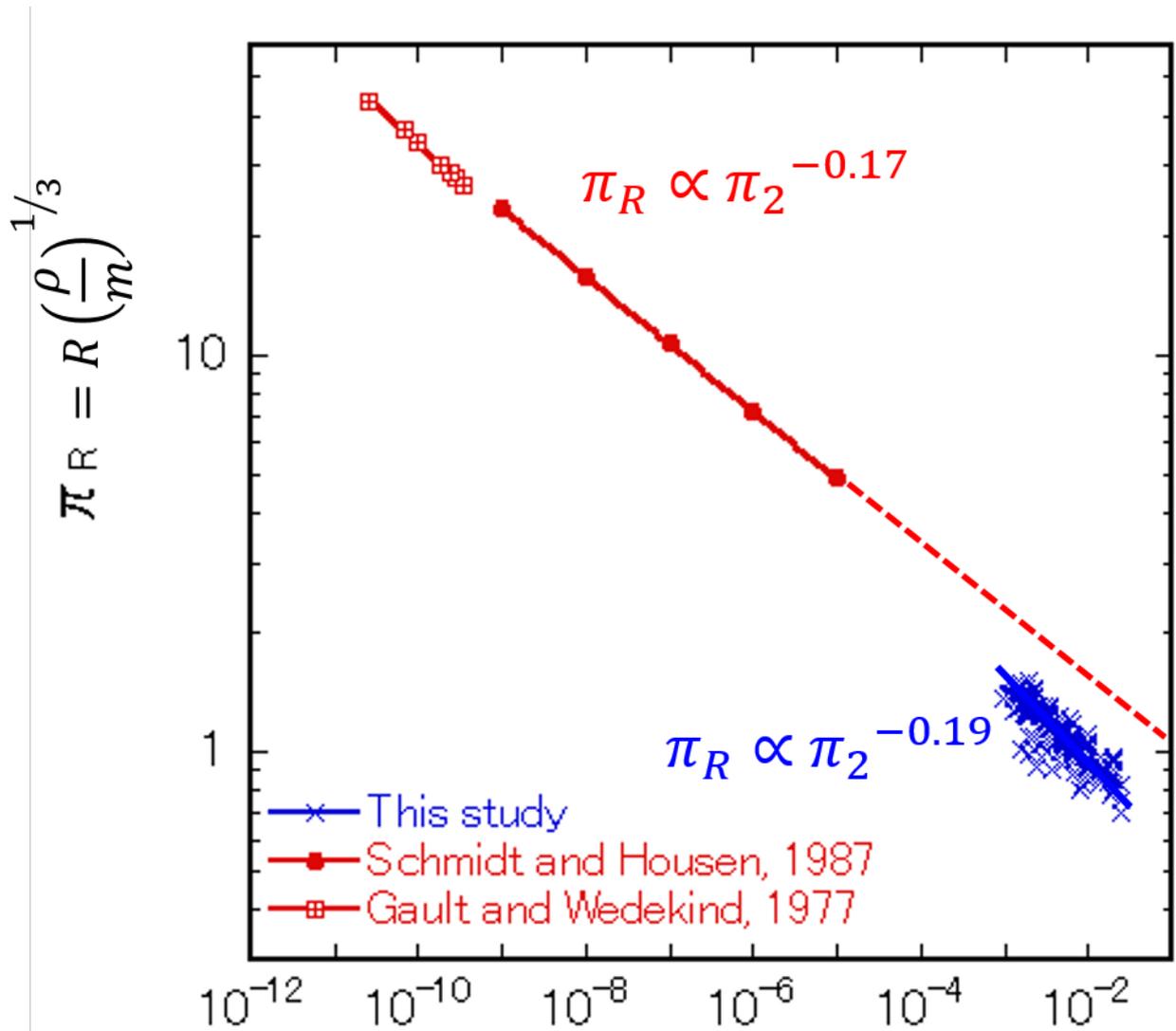
本実験で得られた結果をもとに、1次クレーターから放出されたボルダーがイトカワ表面に再落下した際に形成されるクレーターサイズを見積もった。表面画像よりdimpleに付随するボルダーはメートルサイズであり、このようなボルダーが脱出速度 $0.17 \text{ ms}^{-1}$ でsmooth terrainに衝突した場合を考える。smooth terrainでの粒子層の密度は $0.95 \sim 1.6 \text{ gcm}^{-3}$ と推定され(Kiuchi and Nakamura, 2014)、これらの条件と本実験で得られた低速度域でのスケーリング則から、例として直径2 mのボルダーで直径7 -8 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 - 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

$\rho$ : 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<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。

## 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<sup>1</sup>、亀田 真吾<sup>1</sup>、杉田 精司<sup>2</sup>

\*Tomohiro Takamatsu<sup>1</sup>, Shingo Kameda<sup>1</sup>, Seiji Sugita<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、\*佐々木 晶<sup>1</sup>、廣井 孝弘<sup>2</sup>、松本 徹<sup>3</sup>、土山 明<sup>4</sup>、三宅 亮<sup>4</sup>、平田 岳史<sup>3,4</sup>Mizuki Okazaki<sup>1</sup>, \*Sho Sasaki<sup>1</sup>, Takahiro Hiroi<sup>2</sup>, Toru Matsumoto<sup>3</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>4</sup>, Akira Miyake<sup>4</sup>, Takafumi Hirata<sup>3,4</sup>

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 (npFe<sup>0</sup>) 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 npFe<sup>0</sup> 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 forming npFe<sup>0</sup> 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<sup>1</sup>、\*荒川 政彦<sup>1</sup>、保井 みなみ<sup>1</sup>、松榮 一真<sup>1</sup>、長谷川 直<sup>2</sup>Shota Takano<sup>1</sup>, \*Masahiko Arakawa<sup>1</sup>, Minami Yasui<sup>1</sup>, Kazuma Matsue<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>

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、クレーター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ー形成実験を実施し、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 $\mu$ mの石英砂に水を2.5 wt.%から20wt.%まで加えて-20 $^{\circ}$ C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ー形成実験を行い、その結果を $\pi$ スケール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 $\pi_v=Y/\rho v_i^2$ を用いて $\pi_r=1.0\pi_v^{-0.3}$ の式で整理できることがわかった。なお、 $\rho$ 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 $^{\circ}$ 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<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>、保井 みなみ<sup>1</sup>、松榮 一真<sup>1</sup>、高野 翔太<sup>1</sup>

\*Masashi Okazaki<sup>1</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>, Minami Yasui<sup>1</sup>, Kazuma Matsue<sup>1</sup>, Shota Takano<sup>1</sup>

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/cm<sup>3</sup>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定めることができた。

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<sup>1</sup>、竹石 陽<sup>1</sup>

\*Taishi Nakamoto<sup>1</sup>, Akira Takeishi<sup>1</sup>

1.東京工業大学

1.Tokyo Institute of Technology

Temporal change of <sup>54</sup>Cr isotopic ratio in meteorites:

Chromium has four stable isotopes: their mass numbers are 50, 52, 53, and 54. The ratio of <sup>54</sup>Cr to the major isotope <sup>52</sup>Cr 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 <sup>54</sup>Cr isotopic anomalies in the meteorites are in a good correlation. They thought that this relation is caused by an increase of <sup>54</sup>Cr-rich particles contained in meteorites. Based on this interpretation, they carried out numerical simulations, in which small <sup>54</sup>Cr-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 <sup>54</sup>Cr-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 <sup>54</sup>Cr-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 <sup>54</sup>Cr-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 <sup>54</sup>Cr 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<sup>1</sup>、今村 優志<sup>1</sup>、阿部 新助<sup>1</sup>  
\*Isao Sato<sup>1</sup>, Yushi Imamura<sup>1</sup>, Shinsuke Abe<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、浜野和 博巳、富岡 啓行、上原 貞治、土川 啓

\*Isao Sato<sup>1</sup>, 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<sup>1</sup>

\*Akira Taneko<sup>1</sup>

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」で何を導くことができますか?

「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

