

## 「月惑星探査の来る10年」検討：第二段階パネルからの報告 Planetary Exploration in a Coming Decade Activity: Suggestions from the 2nd-stage committee to proposals

向井 正<sup>1\*</sup>, 杉田 精司<sup>2</sup>, 笠羽 康正<sup>3</sup>, 中村 智樹<sup>4</sup>, 田村 元秀<sup>5</sup>

MUKAI, Tadashi<sup>1\*</sup>, SUGITA, Seiji<sup>2</sup>, KASABA, Yasumasa<sup>3</sup>, NAKAMURA, Tomoki<sup>4</sup>, TAMURA, Motohide<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 東北大学, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 国立天文台

<sup>1</sup>Kobe University, <sup>2</sup>University of Tokyo, <sup>3</sup>Tohoku University, <sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>National Astronomical Observatory

日本惑星科学会の「月惑星探査の来る10年」検討 第二段階パネルは、2011年連合大会から開始し、2011年12月までミッション提案と観測機器提案を募集した。8つのミッション提案と5つの観測機器提案があった。第二段階パネルではこれらの提案を精査し、提案をさらに練りあげていくための意見をまとめた。第二段階パネルからの意見は、各提案者に送られ、さらに提案者とパネルの意見交換を行う予定である。本セッションでは、そうした意見を反映した改訂提案が講演される。第二段階パネルからは、これら13提案の概観を講評する。

キーワード: 惑星探査

Keywords: planetary exploration

## 小型探査機による月着陸実験構想 SLIM の概要 Conceptual Study on SLIM - Lunar Landing Demonstration via Small Explorer

澤井 秀次郎<sup>1\*</sup>, 福田盛介<sup>1</sup>, 水野貴秀<sup>1</sup>, 中谷幸司<sup>1</sup>  
SAWAI, Shujiro<sup>1\*</sup>, Seisuke Fukuda<sup>1</sup>, Takahide Mizuno<sup>1</sup>, Koji Nakaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

<sup>1</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Authors keep perusing the possibility of lunar exploration via small spacecraft. It will enlarge the opportunities of exploration. Especially, high risk challenging missions would become realistic with the small spacecraft. As a first step, smart pin-point landing technology demonstrator, named as SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) is now under conceptual study. This paper summarizes the status of SLIM study.

キーワード: 月面探査, 軟着陸

Keywords: Lunar exploration, Soft Landing

## 月面年代学シリーズ探査

### Lunar landing missions for in-situ dating of impact-melt rocks

諸田 智克<sup>1\*</sup>, 渡邊 誠一郎<sup>1</sup>, 古本 宗充<sup>1</sup>, 本田 親寿<sup>2</sup>, 杉原 孝充<sup>3</sup>, 石原 吉明<sup>4</sup>, 大竹 真紀子<sup>5</sup>, 小林 直樹<sup>5</sup>, 唐牛 譲<sup>6</sup>, 荒井 朋子<sup>7</sup>, 武田 弘<sup>8</sup>, 寺田 健太郎<sup>9</sup>, 杉田 精司<sup>8</sup>, 鎌田 俊一<sup>8</sup>, 長 勇一郎<sup>8</sup>, 三浦 弥生<sup>8</sup>, 佐伯 和人<sup>10</sup>

MOROTA, Tomokatsu<sup>1\*</sup>, WATANABE, Sei-ichiro<sup>1</sup>, FURUMOTO, Muneyoshi<sup>1</sup>, HONDA, Chikatoshi<sup>2</sup>, SUGIHARA, Takamitsu<sup>3</sup>, ISHIHARA, Yoshiaki<sup>4</sup>, OHTAKE, Makiko<sup>5</sup>, KOBAYASHI, Naoki<sup>5</sup>, KAROUJI, Yuzuru<sup>6</sup>, ARAI, Tomoko<sup>7</sup>, TAKEDA, Hiroshi<sup>8</sup>, TERADA, Kentaro<sup>9</sup>, SUGITA, Seiji<sup>8</sup>, KAMATA, Shunichi<sup>8</sup>, CHO, Yuichiro<sup>8</sup>, MIURA, Yayoi N.<sup>8</sup>, SAIKI, Kazuto<sup>10</sup>

<sup>1</sup>名古屋大, <sup>2</sup>会津大, <sup>3</sup>海洋研究開発機構, <sup>4</sup>国立天文台, <sup>5</sup>宇宙研/JAXA, <sup>6</sup>JSPEC/JAXA, <sup>7</sup>千葉工大, <sup>8</sup>東京大, <sup>9</sup>広島大, <sup>10</sup>大阪大

<sup>1</sup>Nagoya Univ., <sup>2</sup>Univ. Aizu, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>NAOJ, <sup>5</sup>ISAS/JAXA, <sup>6</sup>JSPEC/JAXA, <sup>7</sup>Chiba Inst. of Tec., <sup>8</sup>Univ. Tokyo, <sup>9</sup>Hiroshima Univ., <sup>10</sup>Osaka Univ.

月面クレータは太陽系における小天体の衝突合体・破壊進化、軌道進化を記録している。本講演では、その場年代測定にもとづいて、月面の重要地域の年代を決定するシリーズ探査を提案する。搭載機器とその機能を絞り込むことで軽量化し、月面の複数箇所（3～4カ所）を調べるシリーズ探査とする。本提案の重要性は、年代測定と月面クレータ記録を結びつけて、小天体・巨大惑星の軌道進化に制約を与え、現在の太陽系形成の描像を実証・検証することにより、惑星科学コミュニティ全体への波及効果は大きいと考える。

キーワード: 月, 年代測定, 月探査, クレーター年代学

Keywords: moon, radioactive dating, lunar exploration, cratering chronology

## 月裏側高地地殻物質のサンプルリターン提案 Proposed sample return mission from the lunar farside highland

大竹 真紀子<sup>1\*</sup>, 荒井 朋子<sup>2</sup>, 武田 弘<sup>2</sup>, 唐牛 謙<sup>1</sup>, 佐伯 和人<sup>3</sup>, 諸田 智克<sup>4</sup>

OHTAKE, Makiko<sup>1\*</sup>, ARAI, Tomoko<sup>2</sup>, TAKEDA, Hiroshi<sup>2</sup>, KAROUJI, Yuzuru<sup>1</sup>, SAIKI, Kazuto<sup>3</sup>, MOROTA, Tomokatsu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 千葉工大, <sup>3</sup> 大阪大学, <sup>4</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>Osaka University, <sup>4</sup>Nagoya University

Compositional information of the lunar highland is important for understanding the bulk composition and solidification of the lunar magma ocean and for estimating the internal structure of the Moon. However, recent studies [1][2] indicate that the previous understanding [3] of the lunar highland composition based primarily on the lunar samples returned from the nearside by Apollo and Luna missions is insufficient for understanding the overall crustal composition because more primitive highland materials with different composition from the current sample collection, which we do not have, are present in the farside highland.

Therefore, we are proposing a sample return mission to the lunar farside highland to fill the gap in our knowledge by obtaining the most primitive highland material and investigating such previously unknown samples. Information from these samples, such as crystallization age, major and trace element composition, isotopic composition, and crystal texture, are important for understanding the cooling and solidification history of the lunar magma ocean, formation of the crust, degree of differentiation when the highland material crystallized, and composition of the bulk lunar magma ocean.

A region around Freundlich-Sharonov and Dirichlet-Jackson basin where Th content is the lowest [1] and the Mg# (Mg/[Mg+Fe]) in mole percent in mafic minerals is the highest [2], both suggesting that this region is the most primitive highland on the lunar surface, is a potential sampling site. The proposed mission consists of one lander with return capability, a manipulator to collect both regolith and small (a few centimeters in diameter) rocks from around the lander, and spectral cameras for sample selection. Further study is required to estimate the minimum sample requirement of sample number and weight to achieve our scientific goal.

[1] S. Kobayashi, LPSC, #1795 (2010).

[2] M. Ohtake et al., LPSC, #1977 (2011).

[3] P. Warren, Am. Mineralogist, 78, 360-376 (1993).

キーワード: サンプルリターン, 月, 裏側高地地殻, 原始地殻物質

Keywords: sample return, Moon, farside highland, primitive highland material

## 火星大気散逸探査 Mars atmospheric escape exploration

寺田 直樹<sup>1\*</sup>, 松岡 彩子<sup>2</sup>, 関 華奈子<sup>3</sup>, 阿部 琢美<sup>2</sup>, 火星大気散逸探査検討 WG<sup>1</sup>

TERADA, Naoki<sup>1\*</sup>, MATSUOKA, Ayako<sup>2</sup>, SEKI, Kanako<sup>3</sup>, ABE, Takumi<sup>2</sup>, Martian Atmospheric Escape Study Group<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Mars atmospheric escape exploration working group (post-Nozomi mission WG), established on December 2011, has been investigating a mission to study the atmospheric escape from Mars with emphases placed on its possible impacts on the climate change on early Mars and on understanding the habitable zone of unmagnetized terrestrial planets. Although this mission is not proposed to the category of "next decade initiatives for lunar planetary explorations", we consider it fruitful to discuss possible collaborations with relevant research communities. SGEPS's activities toward planetary exploration will be also presented.

キーワード: 火星, 大気散逸, プラズマ, 探査

Keywords: Mars, Atmospheric escape, Plasma, Exploration

## JUICE 及び地上望遠鏡観測による木星雷放電観測の可能性 Possibility of Lightning and thundercloud observation in Jupiter by JUICE and ground-based-telescope

中島 健介<sup>2\*</sup>

NAKAJIMA, Kensuke<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 宇宙理学専攻, <sup>2</sup> 九州大学地球惑星科学科

<sup>1</sup>Dept. CosmoSciences, Hokkaido University, <sup>2</sup>Dept. Earth and Planetary Sciences

Lightning measurement is an excellent way to explore the planetary atmosphere like as in the Earth based on the knowledge of the relationship between the atmospheric dynamics and electrical charge. It has been suggested for a decade that thunderstorms in Jupiter take important roles not only in the investigation of meteorology, which determines the large scale structures such as belt/zone and big ovals, but also in probing the water abundance of the deep atmosphere, which is crucial to constrain the behavior of volatiles in early solar system. Here we suggest lightning measurement with optical camera onboard spacecraft especially in JUICE mission and on a

ground-based telescope. Making use of two H Balmer Alpha line at 656.3 nm filters, the information on the depth of lightning discharge could be derived.

We are suggesting such functions to the onboard camera of JUICE and also plan to try to detect lightning flashes with a 1.6 m reflector of Hokkaido University.

キーワード: 木星, 積乱雲, 雷放電, JUICE, 地上望遠鏡

Keywords: Jupiter, thunderstorm, lightning, JUICE, telescope

## 土星衛星エンセラダスのプルーム物質の化学・生命探査

### Enceladus' exploration: chemical and biological investigations of water-rich plumes

関根 康人<sup>1\*</sup>, 高野 淑識<sup>2</sup>, 矢野 創<sup>3</sup>, 船瀬 龍<sup>3</sup>, 高井 研<sup>2</sup>, 石原盛男<sup>4</sup>, 渋谷 岳造<sup>2</sup>, 橘 省吾<sup>1</sup>, 倉本 圭<sup>5</sup>, 藪田 ひかる<sup>4</sup>, 木村 淳<sup>5</sup>, 古川 善博<sup>6</sup>, 田端 誠<sup>3</sup>

SEKINE, Yasuhito<sup>1\*</sup>, TAKANO, Yoshinori<sup>2</sup>, YANO, Hajime<sup>3</sup>, FUNASE, Ryu<sup>3</sup>, TAKAI, Ken<sup>2</sup>, Morio Ishihara<sup>4</sup>, SHIBUYA, Takazo<sup>2</sup>, TACHIBANA, Shogo<sup>1</sup>, KURAMOTO, Kiyoshi<sup>5</sup>, YABUTA, Hikaru<sup>4</sup>, KIMURA, Jun<sup>5</sup>, FURUKAWA, Yoshihiro<sup>6</sup>, Makoto Tabata<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> JAXA, <sup>4</sup> 大阪大学, <sup>5</sup> 北海道大学, <sup>6</sup> 東北大学

<sup>1</sup> Univ. Tokyo, <sup>2</sup> JAMSTEC, <sup>3</sup> JAXA, <sup>4</sup> Osaka Univ., <sup>5</sup> Hokkaido Univ., <sup>6</sup> Tohoku Univ.

カッシーニ探査機によるエンセラダスの南極付近から噴出するプルームの発見は、「氷衛星の海洋・化学・生命」の理解に飛躍的に迫る、内部海物質の直接サンプリングの可能性を示した大きなブレイクスルーであるといえる。これまでカッシーニによって、プルーム物質は内部の岩石と相互作用する液体の海に由来していることが明らかになったが、1) サンプリング時の相対速度が大きいこと、2) 質量分析装置の分解能が低く測定する質量範囲も狭いこと、などが原因で、内部海の化学組成の推定、化学進化や生命活動を維持するエネルギーの有無を本質的に検証することはできていない。さらにエンセラダス・プルームの存在は、太陽系物質科学や惑星物理学の観点からも極めて重要である。エンセラダスなど土星系規則衛星は、原始太陽系の土星形成領域の微惑星から形成したため、氷衛星物質の採取と詳細な分析は、土星形成領域での揮発性成分の存在形態や温度条件を制約すると期待される。さらに、プルームの噴出する南極と反対の北極では、地質活動は形成以降ほとんど起きておらず、内部構造に何らかの南北非対称が存在しているかもしれない。次世代探査においてこれらの問題を解明することは、エンセラダスの内部海は生命を育む環境か？その環境はいつどのように形成し、いつまで存続するのか？ということ明らかにすることに直結し、さらに21世紀の自然科学における最重要課題である「太陽系における生命生存可能性の理解」に迫るものであるといえる。

本ミッションでは、エンセラダス・プルームの高分解能質量分析 ( $m/z = 2?1000$ ) によるその場定量・同位体分析と、捕獲したプルーム物質に対し詳細な物質化学分析 (サンプルリターン後の放射光による顕微分光イメージングや nano-SIMS など) や生命代謝活性測定 (Radio-tracer 法やカロリーメトリ) を行なうことで、内部海の化学組成の解明、初期太陽系物質進化の制約、そして生命存在可能性を探ることを目的とする。土星系エンセラダス探査という技術的課題の多い探査計画のため、3つのミッション設計の候補を提案する。タイプ1では自由帰還軌道による探査、タイプ2では土星周回軌道投入後のエンセラダス・フライバイを経ての地球帰還探査、タイプ3では土星周回後、エンセラダス極周回軌道に投入し地球帰還する探査である。カッシーニ探査機が  $8?18$  km/s 程度という高速度でサンプリングしていたのに対し、タイプ2、3でのサンプリング速度はそれぞれ約 4 km/s、約 200 m/s であり、タイプ2では含水鉱物や塩化物、有機物が、タイプ3では生命関連分子 (あわよくば望みうる最大の成果としての微小生命そのもの) までも原状態のまま捕獲できる可能性がある。含水鉱物や塩化物の化学・鉱物組成は、内部海組成や熱水活動の有無を制約する極めて重要な物質情報であり、有機物の同位体組成や放射光による顕微分光分析により、鉱物との相互作用や化学進化過程を明らかにすることもできる。また、タイプ3ではレーザー高度計や可視赤外分光カメラにより、潮汐作用に伴う表面変位や地形変化から内部構造を制約する基礎データを取得する。生命に関しては、その活動を直接探査する方法の他にも、プルーム中の気体組成の高分子化合物までの定量を行なうことで、生命現象に由来すると考えられる分子 (バイオマーカー) の存否や、エネルギー論的に見た生命生存可能条件を制約することができる。太陽系物質科学の観点からは、C, H, O, N を含む分子種とそれぞれの同位体比を測定することで、原始太陽系星雲の揮発性元素の分布や均一化が土星領域でどれだけ進行していたのか明らかにすることができるだろう。

本提案は、「宇宙に生命は存在するのか」という根源的な問いに対して科学史上最も明快な答えを導く達成可能性の高いプロジェクトであり、この人類の知的好奇心の究極に位置する科学命題に対して理・工学の様々な分野での次世代を担う若手研究者が惑星探査に参入し結集する点が画期的である。

キーワード: 惑星探査, 土星, 氷衛星, エンセラダス, 海洋

Keywords: planetary exploration, Saturn, icy satellite, Enceladus, ocean

## 107P/Wilson-Harrington サンプルリターン計画 Sample return from 107P/Wilson-Harrington

橋 省吾<sup>1\*</sup>, 浦川 聖太郎<sup>2</sup>, 吉川 真<sup>3</sup>, 中村 良介<sup>4</sup>, 石黒 正晃<sup>5</sup>  
TACHIBANA, Shogo<sup>1\*</sup>, URAKAWA, Seitaro<sup>2</sup>, YOSHIKAWA, Makoto<sup>3</sup>, NAKAMURA, Ryosuke<sup>4</sup>, ISHIGURO, Masateru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 日本スペースガード協会, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所, <sup>5</sup> ソウル大学

<sup>1</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Japan Spaceguard Association, <sup>3</sup>JAXA, <sup>4</sup>AIST, <sup>5</sup>Seoul National University

We propose Sample Return mission from 107P/Wilson-Harrington, which is a dormant comet that potentially preserve pristine minerals, ice, and organics in the early solar system. Several sample return missions from primitive undifferentiated asteroids, such as Hayabusa-2, Osiris-REx, and MarcoPolo-R, have been planned to obtain samples from near-Earth C-type or related asteroids. Compared to those asteroids, 107P/Wilson-Harrington may preserve ice in its interior, and sample return of pristine ice is expected in the proposed mission.

キーワード: サンプルリターン, 始原天体, ウィルソンハリントン

Keywords: sample return, primitive bodies, Wilson-Harrington



## 深宇宙探査技術実験ミッション DESTINY Deep Space Exploration Technology Experiment Mission DESTINY

川勝 康弘<sup>1\*</sup>

KAWAKATSU, Yasuhiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

<sup>1</sup>JAXA/ISAS

DESTINY ( Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage の略) は、ISAS 小型科学衛星 3号機での打ち上げを目指す工学実験機である。3号機のミッション選定は2012年、打上げは2017年に計画されている。

図に示すように、DESTINYはイプシロンロケットで打ち上げられ、地球周回楕円軌道に投入される。大型イオンエンジンにより実験機を加速、軌道高度を上げ、月スイングバイを経てハロー遷移軌道に投入する。ハロー軌道に到達後は、1周回以上軌道を維持し、その後、状況がゆるせば、ハロー軌道を離れ、地球圏内(外)の探査をおこなう。

このミッション・プロファイルの中で、将来の深宇宙探査の鍵となる先端技術に関わる、以下の7つの工学実験を実施する。

### 1. イプシロンロケットによる高エネルギー軌道投入

高エネルギー軌道投入に適したロケットの構成・飛行計画を追求し、イプシロンロケットによる投入能力を評価する。この成果は、イプシロンロケットを用いた深宇宙探査ミッションを構想するための基礎情報となる。

### 2. 薄膜軽量太陽電池パネル

大型イオンエンジンを運転するための大電力を軽量で実現するために、JAXAで開発中の薄膜太陽電池パネルを使用し、その機能・性能を評価する。この太陽電池パネルは、従来品に比して2倍以上の出力・質量比が見込まれ、探査機電源系の質量を大幅に減らすことが期待できる。外惑星探査(JMO、MELOS)や、大型イオンエンジンを要する探査での使用が見込まれる。

### 3. 大型イオンエンジン

DESTINYは、ロケットにより長楕円軌道に投入されたのち、自身の軌道制御によりハロー遷移軌道に到達する。この軌道変換を実現するため、ISASにて開発中の大型イオンエンジン( $\mu 20$ )を使用し、その機能・性能を評価する。このイオンエンジンは、はやぶさで使用された $\mu 10$ の約5倍の推力を有し、イオンエンジンを必要とする大型探査(SOLAR-C、はやぶさ Mk2)での使用が見込まれる。

### 4. 先端的熱制御

DESTINYのミッションモジュールに搭載される大型イオンエンジンは、運転時に500W以上の熱を発生する。限られた放熱面積、軌道制御のために変動する太陽熱入力方向、という厳しい条件下での排熱を実現するため、ループヒートパイプを使用する先端的熱制御系を構成し、その機能・性能を評価する。ループヒートパイプは、複雑に変動する熱環境下で、高度な熱管理が要求されるミッション等で極めて有効な技術である。ミッション期間中の外部熱環境が大きく変化する深宇宙探査や、大発熱機器のオン・オフ等により内部発熱量が大きく変化するミッションでの使用が見込まれる。

### 5. イオンエンジン運転中の軌道決定

イオンエンジンの起動・停止による運用負荷を下げ、軌道制御の運用効率を上げるために、イオンエンジン運転中に軌道決定を実施し、その性能・運用性を評価する。

### 6. 運用の自律化・効率化

衛星マネジメント系を自律化・高機能化し、コマンド運用・テレメトリ取得を効率化し、その運用性を評価する。この技術は、探査機を遠方で運用し、回線も細く伝播遅延時間も長い深宇宙探査で特に有用で、将来の深宇宙探査ミッションすべてでの使用が見込まれる。

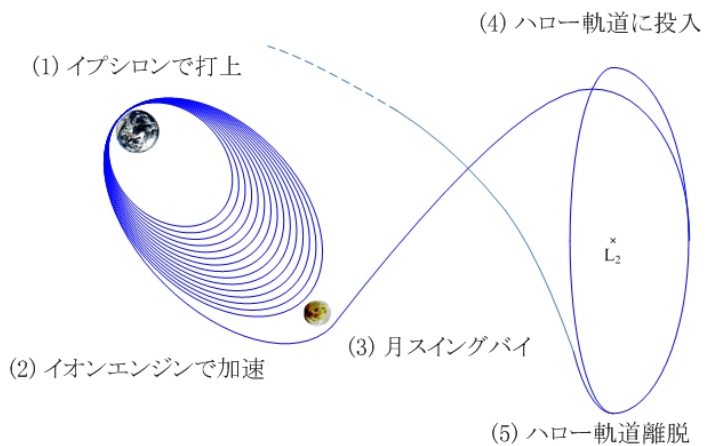
### 7. ハロー軌道遷移・維持の軌道制御

DESTINYは、ハロー軌道に到達し、1周回以上軌道を維持する。軌道投入のリスクを減らし、軌道制御量を抑制するため、力学系理論を用いた軌道制御方法を用い、その性能・運用性を評価する。この技術は、ハロー軌道で運用される次期赤外線天文衛星(SPICA)で使用される計画である。

DESTINY自身は太陽・地球系L2点まわりのハロー軌道に投入されるが、そのミッションプロファイルは、月ミッションや脱出ミッションに容易に応用可能である。また、DESTINY実験機自身の宇宙航行能力は高く、他の打上手段(静止衛星や、他の深宇宙ミッション等の相乗りなど)によるミッションへの応用も可能である。発表では、このような観点から、深宇宙ミッションへの敷居を下げるDESTINYミッションの意義についても論じる。

キーワード: 小型科学衛星, 工学実験, 深宇宙探査, DESTINY

Keywords: Small Science Satellite, Technology Experiment, Deep Space Exploration, DESTINY



## 「月惑星探査の来る10年」検討：第二段階から第三段階への移行 Planetary Exploration in a Coming Decade Activity: From 2nd to 3rd Stage

並木 則行<sup>1\*</sup>, 出村 裕英<sup>2</sup>, 小林 直樹<sup>3</sup>, 大槻 圭史<sup>4</sup>

NAMIKI, Noriyuki<sup>1\*</sup>, DEMURA, Hirohide<sup>2</sup>, KOBAYASHI, Naoki<sup>3</sup>, OHTSUKI, Keiji<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 千葉工業大学 惑星探査研究センター, <sup>2</sup> 公立大学法人会津大学, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, <sup>4</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>PERC/Chitech, <sup>2</sup>The University of Aizu, <sup>3</sup>ISAS/JAXA, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Kobe University

日本惑星科学会 将来惑星探査検討グループでは、日本の惑星探査の長期的な展望を検討し、その検討結果をまとめた報告書の作成を目指している。この検討活動は惑星科学のコミュニティが、惑星科学会会員、非会員を問わず、自らの責任において将来像を描いていく作業である。著者らは事務局としてこの検討作業を支援している。

近年でははやぶさ、かぐやの探査の成功もあって宇宙開発を政策的に推し進めようという機運があり、惑星探査の機会が増えつつある。しかしながら、我が国の惑星探査科学の長期的な成功・発展のためには、科学的視点に立った探査計画の立案のみならず、人材育成や関連基礎研究の推進を含め、惑星探査科学を強力に推進する体制の確立を、惑星科学コミュニティとして益々強化して行くことが不可欠であり急務である。今、個々の研究者はもちろん、コミュニティ全体が強い意志で自律的かつ主体的に探査を推進していくことが求められている。

長期ビジョンの策定を開始するにあたり、我々は以下の5点を検討方針の要点と考えた (A) 惑星科学コミュニティの力量を自覚し、2017年から2027年までの惑星探査将来計画を自主的に検討することを目的とする (B) 惑星科学の第一級の科学(“トップサイエンス”)を抽出するとともに、観測機器提案・ミッション機器提案を募って、コミュニティが支えるミッションを創成する (C) 作業は三段階に分けて行う。第一段階ではトップサイエンスを抽出し、第二段階ではミッション提案と観測器提案を科学的重要性に基づいて統合・改良し、第三段階ではミッション提案と観測器提案の実現性評価を行う (D) 各段階で学会・シンポジウム等での中間報告を繰り返して、広く意見聴取を図る (E) 他の宇宙科学関連学会・コミュニティとの連携を図る。これらを達成するために、検討作業全体には2.5~3年程度がかかると想定している。

2011年連合大会以降、検討は第二段階にはいり、ミッション提案と機器開発提案を受け付けた。これらの提案は第二段階委員によりレビューされ、再検討が行われる。第二段階は本セッションでの議論をもとに日本惑星科学会誌 遊・星・人への報告記事投稿をもって終了する。一方第三段階は、本セッションからスタートとする。

キーワード: 惑星探査

Keywords: Planetary Exploration

## 小惑星 Phaethon 探査提案 Mission proposal for asteroid Phaethon

荒井 朋子<sup>1\*</sup>, 春日敏測<sup>2</sup>, 大塚勝仁<sup>3</sup>, 中村智樹<sup>4</sup>, 中藤亜衣子<sup>4</sup>, 中村良介<sup>5</sup>, 伊藤孝士<sup>2</sup>, 渡部潤一<sup>2</sup>, 小林正規<sup>1</sup>, 川勝康弘<sup>6</sup>, 中村圭子<sup>7</sup>, 小松睦美<sup>8</sup>, 千秋博紀<sup>1</sup>, 和田浩二<sup>1</sup>, 石橋高<sup>1</sup>, 亀田真吾<sup>9</sup>, 大野宗祐<sup>1</sup>, 石丸亮<sup>1</sup>  
ARAI, Tomoko<sup>1\*</sup>, Toshihiro Kasuga<sup>2</sup>, Katsuhito Ohtsuka<sup>3</sup>, Tomoki Nakamura<sup>4</sup>, Aiko Nakato<sup>4</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>5</sup>, Takashi Ito<sup>2</sup>, Junichi Watanabe<sup>2</sup>, Masanori Kobayashi<sup>1</sup>, Yasuhiro Kawakatsu<sup>6</sup>, Keiko Nakamura<sup>7</sup>, Mutsumi Komatsu<sup>8</sup>, Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Ko Ishibashi<sup>1</sup>, Shingo Kameda<sup>9</sup>, Sosuke Ohno<sup>1</sup>, Ryo Ishimaru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 東京流星観測網, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学系研究科, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所, <sup>6</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>7</sup> 米国航空宇宙局, <sup>8</sup> 早稲田大学高等研究所, <sup>9</sup> 立教大学物理学科

<sup>1</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>3</sup>Tokyo Meteor Network, <sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>AIST, <sup>6</sup>JAXA, <sup>7</sup>NASA JSC, <sup>8</sup>Waseda University, <sup>9</sup>Rikkyo University

地球近傍小惑星 Phaethon は、双子座流星群の母天体であるが、彗星活動は乏しく、彗星と小惑星の中間的特徴を持つ active asteroid と考えられている。また、双子座流星群のスペクトル観測結果と始原的分化隕石の分析結果から、Phaethon では、局所的な加熱溶融が起きた可能性が高く、揮発性成分に富む彗星的物質と、加熱を受けた(小)惑星的物質が共存することが期待される。従って、Phaethon は、太陽系の固体惑星形成史の最初期プロセスを解明するための貴重な重要な探査標的である。本講演では、小惑星 Phaethon 及び関連小惑星の探査提案と検討状況を発表する。

キーワード: 小惑星, フェイトン, 彗星, 太陽系形成史, 双子座流星群

Keywords: Asteroid, Phaethon, comet, Solar system evolution, Geminid Meteor Stream

## イトカワ再探査による宇宙衝突実験

### Return to Itokawa: Impact experiment on the rubble-pile asteroid

荒川 政彦<sup>1\*</sup>, 渡邊 誠一郎<sup>3</sup>, 和田 浩二<sup>4</sup>, 小林 正規<sup>4</sup>, 田中 智<sup>5</sup>, 白石 浩章<sup>5</sup>, 飯島 祐一<sup>5</sup>, 小林 直樹<sup>5</sup>, 佐伯 孝尚<sup>5</sup>, 本田 理恵<sup>7</sup>, 門野 敏彦<sup>6</sup>, 鈴木 絢子<sup>8</sup>, 保井 みなみ<sup>2</sup>

ARAKAWA, Masahiko<sup>1\*</sup>, WATANABE, Sei-ichiro<sup>3</sup>, WADA, Koji<sup>4</sup>, KOBAYASHI, Masanori<sup>4</sup>, TANAKA, Satoshi<sup>5</sup>, SHIRAISHI, Hiroaki<sup>5</sup>, Yu-ichi Iijima<sup>5</sup>, KOBAYASHI, Naoki<sup>5</sup>, Takanao Saiki<sup>5</sup>, HONDA, Rie<sup>7</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>6</sup>, SUZUKI, Ayako<sup>8</sup>, YASUI, Minami<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環, <sup>3</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>4</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>5</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, <sup>6</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, <sup>7</sup> 高知大学理学部応用理学科, <sup>8</sup> 惑星科学研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, <sup>3</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>4</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, <sup>5</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>6</sup>Institute of Laser Engineering, Osaka University, <sup>7</sup>Department of Information Science, Kochi University, <sup>8</sup>Center for Planetary Science

小惑星イトカワは、探査機はやぶさにより一度探査された天体であり、さらに表面試料を地球に持ち帰った唯一の小惑星である。はやぶさによる探査はこの小惑星に関して多くの科学的成果を挙げたが、同時にさらなる研究課題と探査の可能性を提示した。

このミッションは、一度探査したイトカワを再探査することにより、イトカワから得られる科学的知見をさらに深化させることを目的としている。再探査においては、すでに対象天体の基本的情報（表面地形、重力場等）を持っているので、探査計画の立案においては未知の天体とは大きく異なり、より具体的に探査対象に特化した観測機器を搭載することが可能である。さらに、一度目の探査から得られた成果をさらに発展させる探査計画や、新たにもたらされた疑問に答えるような問題解決型の探査計画の立案も可能である。例えば、イトカワでは表面粒子の運動が活発であることが予想されているので、はやぶさ探査との比較により、10 数年間の表面粒子流の運動を調べることが可能である。

今回提案するミッションは、この再探査のメリットを最大限に生かすために、イトカワ表面で宇宙衝突実験を行う。そして、小惑星環境での衝突物理の解明と衝突によるアクティブ探査を通じた内部構造探査を実施する。

宇宙衝突実験は、はやぶさ2で開発されている SCI 改良型を用いて行う。イトカワの表面地形は既知であるのであらかじめ研究に最も適した衝突点を選定して、ピンポイントでの衝突実験が可能である。このために改良 SCI では姿勢制御機構を持ち、衝突精度を ± 10m にまで上げる。衝突物理の解明に関しては、ラブルパイル微小天体の衝突時の力学物性をモデル化するためにミュージズの海へのクレーター形成実験を行う。このクレーター形成実験により、クレータースケール則における微小重力の効果を明らかにし、さらに、現実の小惑星表面におけるクレーター形成条件のアンカーを打つ。クレーターの研究には、その成長をその場観察する必要がある。そこで、観測用の子衛星を本体から分離運用してクレーターの成長の様子を子衛星に搭載した広角カメラ、望遠カメラ、ダストカウンター、ダストライダーにより観測する。

内部構造探査に関しては、改良 SCI を衝突させる以前に、月探査用ペネトレーターを小惑星用に改良したもの（小惑星ペネトレーター）をミュージズの海に 10m/s 程度で衝突・設置させて、3本のペネトレーターによる地震計ネットワークを事前に構築しておく。ペネトレーターの設置時には、搭載された加速度計により、小惑星表面に衝突貫入した時の抵抗力を計測し、表層を構成する小石層のモデル化に役立てる。改良 SCI の衝突により励起された弾性波をこれらの地震計で観測することにより、ミュージズの海の内部構造や微小重力下での粉粒体に関する情報を取得する。この衝突による地震波内部構造探査を効率的に行うために、電波探査による内部構造のグローバルサーベイも実施する。また、イトカワを構成する岩石の物性は、地震波探査や電波探査の結果を解釈する上で極めて重要である。そのため、ミュージズの海の cm サイズの小石を破壊せずに回収する試料サンプリングを行い、地球に持ち帰って物性測定を行う。

これからの実験データとクレーター形成実験の結果から、微小重力下の粉粒体の運動をモデル化し、仮想天体である微惑星の物理モデルを提案する。

キーワード: イトカワ, 再探査, 衝突実験, はやぶさ

Keywords: Itokawa, re-exploration, Impact experiment, Hayabusa

## ソーラーセイル探査機によるトロヤ群小惑星探査および惑星間塵観測 Exploration of Trojan asteroids and interplanetary dust complex by a solar sail mission

中村 良介<sup>1\*</sup>, 矢野 創<sup>2</sup>, 船瀬 龍<sup>2</sup>, 高遠 徳尚<sup>3</sup>, 吉田 二美<sup>3</sup>, 小久保 英一郎<sup>3</sup>, 津田雄一<sup>2</sup>, 松浦周二<sup>2</sup>, 森 治<sup>2</sup>  
NAKAMURA, Ryosuke<sup>1\*</sup>, YANO, Hajime<sup>2</sup>, FUNASE, Ryu<sup>2</sup>, TAKATO, Naruhisa<sup>3</sup>, YOSHIDA, Fumi<sup>3</sup>, KOKUBO, Eiichiro<sup>3</sup>,  
Tsuda Yuuich<sup>2</sup>, Matsuura Shuji<sup>2</sup>, MORI, Osamu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 国立天文台

<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>ISAS/JAXA, <sup>3</sup>NAOJ

「小惑星はなぜ惑星になれなかったのか?」「地球型固体惑星と木星型ガス惑星の間 (snow line 付近) には、どの惑星系でも一般的に小惑星帯が形成されるのか?」これらは惑星形成論に興味を持つ者であれば、誰しも持つはずの基本的な疑問であろう。この疑問に答えるためには、

- ・ 微惑星の合体成長から衝突破壊への転換が、いつどのように起こったのか
- ・ Snow line の外側と内側で微惑星の組成・成長過程がどのように変化したか

という2つの過程を明らかにしなくてはならない。木星軌道に到達する Solar Sail 探査機によって (1) 惑星間塵の光学観測および「その場」計測 (2) 木星との 1:1 共鳴にあるトロヤ群小惑星とのランデブー探査を行うミッションを提案する。惑星間塵観測は、現在の太陽系における小惑星の衝突破壊についての知見をもたらし、トロヤ群小惑星探査は木星以遠での微惑星形成とその後の合体成長過程について大きな制約を与える。

キーワード: ソーラーセイル, 小惑星, 彗星, 惑星間塵

Keywords: Solar sail, asteroid, comet, Interplanetary dust

## 月・惑星着陸探査用元素分析装置：レーザー誘起絶縁破壊分光装置 (LIBS) Elemental analysis instrument for landed lunar and planetary explorations: Laser-induced breakdown spectrometer (LIBS)

石橋 高<sup>1\*</sup>、並木 則行<sup>1</sup>、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>、大野 宗祐<sup>1</sup>、亀田 真吾<sup>2</sup>、長 勇一郎<sup>3</sup>、杉田 精司<sup>4</sup>  
ISHIBASHI, Ko<sup>1\*</sup>, NAMIKI, Noriyuki<sup>1</sup>, ARAI, Tomoko<sup>1</sup>, KOBAYASHI, Masanori<sup>1</sup>, SENSHU, Hiroki<sup>1</sup>, WADA, Koji<sup>1</sup>, OHNO, Sohsuke<sup>1</sup>, KAMEDA, Shingo<sup>2</sup>, CHO, Yuichiro<sup>3</sup>, SUGITA, Seiji<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 千葉工業大学・惑星探査研究センター、<sup>2</sup> 立教大学・理・物理、<sup>3</sup> 東京大学・理・地球惑星科学、<sup>4</sup> 東京大学・新領域・複雑理工学

<sup>1</sup>PERC, Chitech, <sup>2</sup>Dept. Phys., Col. Sci., Rikkyo Univ., <sup>3</sup>Dept. Earth. Planet. Sci., Univ. Tokyo, <sup>4</sup>Dept. Complex. Sci. Eng., Univ. Tokyo

我々は、「月惑星探査の来たる10年」第二段階パネルへの個別観測機器提案として、レーザー誘起絶縁破壊分光装置 (LIBS; laser-induced breakdown spectrometer) の提案を行った。本稿ではその概要を説明する。

月惑星の固体系探査は一般的に周回衛星によるリモートセンシング、着陸機とローバによるその場観察、サンプルリターン、有人探査の段階を経て進められる。今後の月惑星探査は各国ともサンプルリターンの段階へと移行してゆくと考えられる。しかし、これまでのリモートセンシングによる月惑星探査では、太陽系の各天体が複雑多様な表層組成を示しており、「どこからでも良いからサンプルを持ち帰れば、その天体の起源や進化がわかる」というほど単純なサンプルリターンはあり得ないことを明確に示している。従来の惑星探査の経験、特に火星着陸探査から、複数点への着陸によるその場観測の必要性和、着陸地点の地質という“文脈”を理解することの重要性が強く指摘されている。従って、サンプルリターンの前段階として着陸地質探査は必須であり、その場合ローバを使った広範囲の移動能力が不可欠である。また、個々の試料分析に時間を要してしまえばローバの移動能力を活かせないので、簡易で効率的な元素分析装置が必須である。LIBSはそのような月惑星表層探査に適した元素分析装置である。着陸探査においては、着陸地点とその周囲の領域において岩石・鉱物の組成を測りその分布を明らかにすることが求められるが、LIBSはその要請に十分答えられる機器である。

LIBSの測定原理は以下のとおりである。パルスレーザー光を測定対象試料上に集光し、その一部を蒸発・プラズマ化する。プラズマ中で励起された原子やイオンは時間の経過に伴い脱励起して低エネルギー状態に移行するが、脱励起前後のエネルギーレベルの差に応じた波長の電磁波(紫外～近赤外光)を放出する。それを分光測定し、試料中に含まれている元素の輝線スペクトルを取得する。輝線の位置は各元素に固有であり、輝線の強度は元素濃度に相関があるため、スペクトルを解析することで試料の定性および定量分析、すなわち元素濃度測定や鉱物の分類などが可能である。

LIBSは以下のような特徴を持つ。(1) 遠隔分析可能(現実的には最大10m程度)(2) 短時間でのデータ取得(最短で数秒)(3) 軽元素を含むほぼすべての元素を測定可能、(4) 高空間分解能(数十 $\mu\text{m}$ ～数mm)(5) 試料の前処理が不要、(6) 放射線源不要。これらの特徴により、LIBSは着陸機やローバ探査に最も適した元素分析装置になると期待されている。一方で、従来の手法に比べて定量精度にやや欠ける、という問題もあった。しかし、多変量解析を用いたスペクトル解析手法の改善により、この問題は克服されつつある。

LIBSの構成は、基本的にはレーザー、分光器、光学系であるが、着陸探査機(ローバ、ランダー)のサイズや探査目的に応じて様々な形態が考えられる。「測定距離可変遠隔LIBS」では、測定距離可変の望遠鏡を用いて観測対象上へのレーザー光の集光およびプラズマ光の分光器への集光を行い、遠隔測定が可能である。着陸機・ローバが移動せずに周囲の複数の試料の迅速な測定が可能であり、LIBSの利点を十二分に活用できる構成である。ただし、この構成では、測定距離を変えるための光学系の駆動機構、遠方へのレーザー光の集光や遠方からのプラズマ光の集光のための大きな口径の反射鏡、高出力のレーザーが必要であるため、重量・サイズは増加する傾向にある。「測定距離固定近接LIBS」では、光学系の測定距離は固定し、ロボットアームに搭載したレーザーおよび光学系を測定対象付近へ移動することで測定を行う。光学系の駆動機構は必要なく、レンズ口径も小さくて済むため、小型・軽量化が可能である。

LIBSは、特にローバへの搭載によりその性能が発揮される。ローバによる探査では、LIBSによってローバから離れた地点にある複数の試料の迅速な元素組成計測(1測定あたり数秒～数分)を行うことで、ローバが進むべき興味深い地点の選定が可能となる。そのような地点まで移動して他の観測機器による測定(XRFなど、対象への接近の必要があり、時間を要する測定)を行い、より確かなデータを得ることができる。また、将来的にサンプルリターンを行う場合にも、多地点の測定を迅速に行なうことのできるLIBSは、適切な回収試料を探すのに最適な装置であると言える。

このように、LIBSはこれまでの元素分析装置にはない様々な特徴を持っており、将来の着陸月・惑星探査において、非常に有用なその場元素分析装置になると期待される。

キーワード: 元素分析, 地質探査, 惑星探査, LIBS, 月, 火星

Keywords: elemental analysis, geological exploration, planetary exploration, LIBS, Moon, Mars

## 月惑星探査ローバ搭載用 LIBS を用いた運用試験 Operataion test of LIBS onboard lunar and planetary rover

亀田 真吾<sup>1\*</sup>, 石橋 高<sup>2</sup>, 長 勇一郎<sup>3</sup>, 小林 正規<sup>2</sup>, 荒井 朋子<sup>2</sup>, 並木 則行<sup>2</sup>

KAMEDA, Shingo<sup>1\*</sup>, ISHIBASHI, Ko<sup>2</sup>, CHO, Yuichiro<sup>3</sup>, KOBAYASHI, Masanori<sup>2</sup>, ARAI, Tomoko<sup>2</sup>, NAMIKI, Noriyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 立教大学, <sup>2</sup> 千葉工業大学, <sup>3</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Rikkyo University, <sup>2</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>The University of Tokyo

現在我々は月惑星探査における LIBS(レーザー誘起絶縁破壊分光) 実験の検討を行なっている。2011 年 11 月に熊本県阿蘇山の山頂において、JAXA の月惑星探査ローバ試作機に LIBS 焦点調整機能検証器を搭載し、走行試験と合焦試験を実施した。また、2012 年 1 月には JAXA 相模原キャンパス内において、小型ローバに LIBS 試作機を搭載し、走行試験と岩石の元素分析性能試験を実施した。本発表ではこの試験内容、試験結果について報告する。また、現在では試験結果を受けて設計を変更する予定であり、今新設計の内容や、今後の開発計画について説明する。



## K-Ar 法を用いた月・火星着陸探査用その場年代計測装置 Development of an in-situ K-Ar dating instrument for landing planetary missions

長 勇一郎<sup>1\*</sup>, 杉田 精司<sup>2</sup>, 三浦 弥生<sup>3</sup>, 亀田 真吾<sup>4</sup>, 諸田 智克<sup>5</sup>, 吉岡 和夫<sup>4</sup>, 岡崎 隆司<sup>6</sup>, 並木 則行<sup>7</sup>, 荒井 朋子<sup>7</sup>, 小林 正規<sup>7</sup>, 石橋 高<sup>7</sup>, 大野 宗祐<sup>7</sup>, 千秋 博紀<sup>7</sup>, 和田 浩二<sup>7</sup>, 橘 省吾<sup>1</sup>

CHO, Yuichiro<sup>1\*</sup>, SUGITA, Seiji<sup>2</sup>, MIURA, Yayoi N.<sup>3</sup>, KAMEDA, Shingo<sup>4</sup>, MOROTA, Tomokatsu<sup>5</sup>, YOSHIOKA, Kazuo<sup>4</sup>, OKAZAKI, Ryuji<sup>6</sup>, NAMIKI, Noriyuki<sup>7</sup>, ARAI, Tomoko<sup>7</sup>, KOBAYASHI, Masanori<sup>7</sup>, ISHIBASHI, Ko<sup>7</sup>, OHNO, Sohuke<sup>7</sup>, SENSHU, Hiroki<sup>7</sup>, WADA, Koji<sup>7</sup>, TACHIBANA, Shogo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学複雑理工学専攻, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 立教大学理学部, <sup>5</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>6</sup> 九州大学大学院理学研究院, <sup>7</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Complexity Science and Engineering, Graduate School of Frontier Science, The University, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>4</sup>Department of Science, Rikkyo University, <sup>5</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>6</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, <sup>7</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

惑星全体の歴史を理解する上で不可欠な観測量でありながら、周回機からのリモートセンシングでは得ることができない観測量に、地質形成年代がある。本発表で提案するその場年代計測は、世界のどの国も天体表面上で実施した実績は持っておらず、開発途上の技術である。また、日本国内には開発を進めている研究グループは存在しない。そこで我々は、その場 K-Ar 計測装置の基礎特性の解明から取り組み、日本の独自技術としてその場年代計測装置を開発する基盤を作りたいと考えている。

例えば火星においては、表面のどの地点でも絶対年代が計測されたことが無く、月の年代学関数をベースに、重力効果や衝突天体の軌道要素・衝突確率の違いからの解析的研究にもとづいてクレーター年代学関数を推定しているに過ぎない。そのため火星の絶対年代には大きいところで 10 億年にも上る不定性があり、火星の内部進化や地質活動、気候進化の定量的な議論の遅れの原因となっている。そこで火星着陸機・ローバにおいては、火星表面上に残る溶岩流の形成年代を決定し、既存の相対クレーター年代と組み合わせることによって、火星の絶対年代スケールを獲得することが最大目標となる。

近い将来に実現が望まれる月面からの試料回収探査機への搭載も重要な候補である。既に絶対年代データが得られている月においても、アポロ計画で得られたクレーター生成率のデータに大きな疑問が投げかけられているのが現状である。アポロで地球にもたらされた岩石試料の大半は、天体衝突による衝撃変成を激しく受けた本来の固化年代の情報を失ってしまった試料であった。このような衝撃変成を受けてしまった岩石を持ち帰ってしまったのでは、月面試料回収探査としては成功とは言いにくい。本提案のような固化年代のその場計測が実現すれば、形成以降、比較的最近に同位体時計のリセットを経験した岩石かどうかの判別ができるようになるため、本当に必要な試料を惑星表面上で選別するための指標となり、月面試料回収探査計画の科学的価値を飛躍的に向上させることになる。

本手法では、真空容器に採取した岩石にパルスレーザーを照射してプラズマを生成し、放射される K 輝線の LIBS(レーザー誘起絶縁破壊分光法)計測と、同時に放出される Ar ガスの QMS(四重極質量分析計)計測を組み合わせることで K-Ar 年代を算出する(LIBS-QMS 法)。装置は試料を導入する真空チャンバー、レーザー、レーザー照射位置移動機構、鉱物観察用 CCD カメラ、分光器、QMS、ガスを精製するゲッター、真空ポンプおよび要素同士を連結する真空ラインから構成される(但し、大気のない月探査では真空ポンプが不要となるためリソースは大きく節約できる)。本手法の最大の特徴は、レーザーによるスポット分析( $\sim 100 \mu\text{m}$ )を利用して 1 つの岩石サンプルに対して複数の鉱物の計測を行うことが可能なため、アイソクロン法による計測が可能となることにある。これは従来の提案法(全岩分析)では不可能であった、年代計測の精度と確度を圧倒的に向上できるメリットを持つ。

これまでの実験から、K-Ar 年代その場計測装置を確立するためには以下の三点を解決することが鍵になると考えられる。(1) マトリックス効果に由来する K 定量性の悪さ、(2) K・Ar の検出限界 ( $K=1000 \text{ ppm}$ ,  $^{40}\text{Ar}\sim 10^{-11} \text{ cc}$ ,  $^{36}\text{Ar}\sim 2\times 10^{-11} \text{ cc}$ ) の引き下げ、および(3) サンプルハンドリング機構、小型軽量化等の工学的課題、である。(1) については近年のスペクトル解析手法の発達によって、この効果を取り除くことが出来るようになりつつある。また K 輝線の絶対強度を用いる古典的な検量線法によっても 15% 程度の精度で K 量の計測が可能であることが示されており(長ら, 2011, 連合大会)、K 定量に特化したスペクトル解析手法を導入することで更に高精度の定量が可能になる公算は高い。(2) に対しては、既存の装置を改良して直径 40 mm の集光レンズをプラズマ発光部から 100 mm という至近距離に設置して集光効率を向上させるとともに、検出器の感度特性、光ファイバーの透過率、分光器のスリット幅などを検討し直してハード面の感度向上を図った。予備的な結果では、一般的な CCD 検出器を搭載した商用ベースの小型分光器( $\sim 500 \text{ g}$ )によっても、約 4000 ppm の  $\text{K}_2\text{O}$  を持つ火成岩試料に対して良い S/N で K 発光輝線を検出できることが確認されており、一桁程度の検出限界引き下げも達成可能でありそうだという感触を得ている。一方の Ar の検出限界は、レーザー条件(エネルギー、ビームプロファイル)の最適化や、排気システムのオイルフリー化による QMS のブランクレベルの低減、および真空ライン

# Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS23-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 17:15-18:30

の小型化による感度の向上が必要で、既に実験を開始している。(3)に関しては、サンプル採取・導入機構や装置の小型化を業者を交えながら検討することとしている。2012年度中には年代計測法の確立、2013年度中には小型部品を用いたBBMの製作を行う予定である。

キーワード: その場年代計測, カリウム・アルゴン法, 惑星着陸探査

Keywords: In-situ dating, K-Ar dating, Landing mission, LIBS-QMS

## 火星生命探査機器群提案 Equipments for life search exploration on Mars

山岸 明彦<sup>1\*</sup>, 吉村 義隆<sup>2</sup>, 長沼 毅<sup>3</sup>, 宮川 厚夫<sup>4</sup>, 出村 裕英<sup>5</sup>, 豊田 岐聡<sup>6</sup>, 本多 元<sup>7</sup>, 小林 憲正<sup>8</sup>, 大野 宗祐<sup>9</sup>, 石丸 亮<sup>9</sup>, 石上 玄也<sup>10</sup>, 佐々木 晶<sup>11</sup>, 宮本 英昭<sup>12</sup>  
YAMAGISHI, Akihiko<sup>1\*</sup>, YOSHIMURA, Yoshitaka<sup>2</sup>, NAGANUMA, Takeshi<sup>3</sup>, MIYAKAWA, Atsuo<sup>4</sup>, DEMURA, Hirohide<sup>5</sup>, Michisato Toyoda<sup>6</sup>, HONDA, Hajime<sup>7</sup>, KOBAYASHI, Kensei<sup>8</sup>, OHNO, Sohsuke<sup>9</sup>, ISHIMARU, Ryo<sup>9</sup>, Genya Ishigami<sup>10</sup>, SASAKI, Sho<sup>11</sup>, MIYAMOTO, Hideaki<sup>12</sup>

<sup>1</sup> 東京薬科大学生命科学部, <sup>2</sup> 玉川大学, <sup>3</sup> 広島大学大学院生物圏科学研究科, <sup>4</sup> 静岡大学, <sup>5</sup> 会津大学, <sup>6</sup> 大阪大学, <sup>7</sup> 長岡技術科学大学, <sup>8</sup> 横浜国立大学大学院工学研究院, <sup>9</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>10</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>11</sup> 国立天文台, <sup>12</sup> 東京大学総合研究博物館

<sup>1</sup>Depart. Mol. Biol., Tokyo Univ. Pharm. Life Scie., <sup>2</sup>Tamagawa University, <sup>3</sup>Hiroshima University, <sup>4</sup>Shizuoka University, <sup>5</sup>Aizu University, <sup>6</sup>Osaka University, <sup>7</sup>Nagaoka Institute of Technology, <sup>8</sup>Yokohama National University, <sup>9</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>10</sup>ISAS/JAXA, <sup>11</sup>RISE Project Office National Astronomical Observatory of Japan, <sup>12</sup>The University Museum, The University of Tokyo

近年の探査により、火星表層には、かつて大量の液体の水が存在していたこと、温暖湿潤な気候がある程度長期間保たれていたこと、そして火星は強い磁場を保持していたことが明らかにされた。これらを端的にまとめると、生命が生まれた頃の地球と極めて類似した環境を火星が持ち合わせていたという事に他ならない。こうした理由から、我々地球生命がどこから来て、どのような位置づけを持つかという究極的な問いに答えるために、火星は最も重要な研究対象であるといえる。

火星におけるメタンの発見と、地球におけるメタン酸化鉄還元細菌の発見 (Bealら 2009) から、我々は火星表面において現在もまだメタン酸化鉄還元細菌 (化学合成微生物の一種) が生存しているのではないかと推定するに至った。この菌はメタンを生成するメタン菌とは全く別の菌であり、表層付近で生育する可能性がある。火星の様々な環境は生命が十分に生存可能な環境である。また、紫外線は様々な物質によって吸収されるので、薄い火星土壌に覆われるだけで、火星表面も十分に生育可能な環境となる。従って、メタンと酸化鉄のような酸化型物質の両者がある場所であれば、数センチメートル程度の深さでも微生物は生存している可能性がある。こうした状況から、我々は火星地下深部を掘削する必要が無いという点を世界で初めて指摘するとともに、火星において生命を直接探査することを、現在の技術レベルでも十分に実現可能な手法を用いて、世界に先駆けて提案することとした。なお計画の特性から、火星表面における有機物や地質探査も同時に行うことができると考えている。

キーワード: 火星, 生命探査, 蛍光顕微鏡, アミノ酸分析, 質量分析装置, メタン酸化菌

Keywords: Mars, Life search, Fluorescence microscope, Amino acid analysis, Mass spectroscopy, Methane oxidizer

## 火星ペネトレータによる表層環境と内部構造探査 Investigation of Martian surface and interior structure by penetrator probe

白石 浩章<sup>1\*</sup>, 山田 竜平<sup>2</sup>, 石原 吉明<sup>2</sup>, 小林 直樹<sup>1</sup>, 鈴木 宏二郎<sup>3</sup>, 田中 智<sup>1</sup>

SHIRAISHI, Hiroaki<sup>1\*</sup>, YAMADA, Ryuhei<sup>2</sup>, ISHIHARA, Yoshiaki<sup>2</sup>, KOBAYASHI, Naoki<sup>1</sup>, SUZUKI, Kojiro<sup>3</sup>, TANAKA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, <sup>3</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>National Astronomical Observatory of Japan, RISE project, <sup>3</sup>Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

火星表層環境および内部構造を分散して観測する「ペネトレータミッション」を提案する。火星探査用ペネトレータは表層2~3mに潜り込むプローブ本体に加えて、表面に残存するアフターボディ構造を有することでそれぞれに科学機器を搭載して「内部構造」と「表層環境」を観測できるシステムとする。貫入する本体には内部構造および表層直下の物理特性・化学組成を観測するために地震計、加速度計、ガンマ線・中性子線分光計・熱伝導率計・温度計を搭載候補とし、アフターボディには圧力計、湿度計、温度計、磁力計、モニタカメラ等を搭載候補として表層環境をモニターする。また、アフターボディ構造には太陽電池パネルと通信用アンテナの他、VLBI電波源を搭載して周回衛星とのデータリレー中に火星の自転変動計測を実施する。

火星大気中にエントリー降下中には大気構造・磁場などに関する情報も取得する。ペネトレータは4機構成として火山地形や断層地形が密に存在すると考えられる領域に分散して設置する。特に、比較的最近まで火成活動が起こっていたと考えられている Elysium 地域や、断層地形の分布から現在も地震活動が起こっていることが予想される Tharsis 地域については、過去の軟着陸ミッションでも探査が行われていない高い標高地域にも対応するため有力な設置候補地点と考えている。火星大気による減速を十分に利用して低高度地域に軟着陸せざるを得ないランダーミッションに比べて、高速のまま貫入設置できるペネトレータの特色を生かすことができる。例えば、Elysium 地域のようなクレーター年代が比較的若い地域周辺に100~300km間隔でペネトレータを配置し、火星内部の地震活動度(発生頻度とマグニチュード)を調べる。火星における地震探査の試みはバイキング着陸機による例があるが、観測機器の性能や設置環境の制約によって内部地震を明確に同定するには至っていない。そのため、隕石衝突起源イベントの頻度・サイズ分布と合わせて火星の地震発生状況を知ることが最も重要な理学目的である。配置された測線距離および内部地震の規模によって地殻・上部マントルに至る弾性的構造を調べることも可能である。特に、浅部の主要な物質境界面となる地殻の厚さと密度の決定は地球型惑星の分化過程の理解のために重要な物理量である。衝突起源の地震イベントは現在の火星への隕石衝突頻度とサイズ分布を把握するとともに、比較的大きな衝突イベントを検出できれば地殻・上部マントル構造と水平方向の不均質性を知るうえで有力な手段となりうる。他の領域に比較して最近まで火成活動が起こっていた領域ではスポット的に高い地殻熱流量の値が期待できるため、その上限を抑えるだけでも火成活動の有無や時期についての情報が得られる。また、過去の火星周回衛星による熱慣性・放射特性マップや線分光計データの Ground Truth として、表層物質の熱伝導率や貫入減速時の加速度プロファイルはその物理特性を理解する基礎データであり、氷層や凍土の有無やレゴリスの層序を理解することの一助となる。さらに、熱流量の長期観測は表層構造の季節変動についての基礎データを与える。一方、周回衛星との連携観測として、ペネトレータに搭載した電波源によって火星の回転運動を測定してコアのサイズと様態について制約を与える。周回衛星には光学カメラ(分解能2~3m程度)を搭載して、ペネトレータの観測運用中に隕石が衝突して形成されたクレーターや地すべりの発生位置を検出する。同定されたイベントは既知の震源位置として地震波による内部構造解析に利用することができる。将来の火星探査ミッションに対する展望として本提案は本格的な多点ネットワークミッションのプレカーサと位置づけることができる。つまり、火星内部地震・隕石衝突の発生頻度やマグニチュードの情報はその後の火星探査において最適なネットワーク配置の検討、観測機器の仕様決定や運用計画の策定に重要な情報となる。また、表層の気象観測量(温度・圧力・磁場など)の日周・季節変動データは広帯域地震計にとっての環境ノイズ源でもあることから、波形データの校正に極めて有用であるとともに将来の広帯域地震探査において展開・設置方法を最適化する際の基礎資料にもなる。

キーワード: 火星, 表層環境, 内部構造, ペネトレータ

Keywords: Mars, Surface environment, Internal structure, penetrator

## 光計測を用いた極限環境用地震計の開発

### Development of optical seismometers for observations at extreme environments

新谷 昌人<sup>1\*</sup>, 堀 輝人<sup>1</sup>, 西川 泰弘<sup>1</sup>, 小林 直樹<sup>2</sup>, 白石 浩章<sup>2</sup>, 鹿熊 英昭<sup>3</sup>, 石原 吉明<sup>4</sup>

ARAYA, Akito<sup>1\*</sup>, HORI, Teruhito<sup>1</sup>, NISHIKAWA, yasuhiko<sup>1</sup>, KOBAYASHI, Naoki<sup>2</sup>, SHIRAIISHI, Hiroaki<sup>2</sup>, KAKUMA, Hideaki<sup>3</sup>, ISHIHARA, Yoshiaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup>JAXA 宇宙研, <sup>3</sup> 地震予知振興会, <sup>4</sup> 国立天文台 RISE

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>ISAS, JAXA, <sup>3</sup>ADEP, <sup>4</sup>NAO, RISE

月・惑星の地下構造の探査には地震観測が有効である。とくに深部を含む全球的な構造解明には長周期地震波を検知できる広帯域地震計による観測が不可欠である。月や火星の探査においてはこれまで短周期を主とした限られた地震観測しか行われていないが、もし広帯域地震計を設置できれば、多くの情報が得られるであろう。一方、地球上でも深層ポアホールに地震計を設置できれば低ノイズの環境で震源域近傍における観測が可能となる。このように、温度・放射線・電力/スペースの制約・運搬/設置の衝撃など、従来の地上観測と大きく異なる極限環境において動作可能な広帯域地震計は今後必須の観測機器であると考えられる。われわれは極限環境で使用できる広帯域地震計の開発をすすめている。おもりの変位検出にレーザ干渉計を使用し、高い検出性能を保ちつつ光計測により極限環境下でも動作可能な原理を用いている。

これまでの研究でレーザ干渉式広帯域地震計の安定動作、1mHz~50Hzまでの帯域での広帯域観測、雑音レベルの評価をプロトタイプ(幅200mm×高さ210mm×奥行115mm)を用いて実施した。光ファイバーで干渉計部分にレーザ光を導入し、干渉光の取り出しも光ファイバーで行っている。並行して、レーザ干渉計部分の高温環境耐性の試験を実施した。外部から光を導入できる特殊な構造の高温試験装置を開発し、室温から290度までの範囲で必要な干渉信号が得られることを確認した。

現在、地下深部や月・火星への設置を目指して、さらなる小型化と装置の自動化を進めている。光計測はさまざまな環境や柔軟な構成で動作可能であり、金星や水星、外惑星の氷衛星など極端な温度環境の探査へも応用が見込まれる。

キーワード: 地震計, 広帯域, 惑星探査, レーザー, 干渉計

Keywords: seismometer, broadband, planetary exploration, laser, interferometer