

## 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ゼス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）をミュゼスの海に 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、ミュゼス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、ミュゼスの海の 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, Sohshuke<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、地球上でも深層ボ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