

探査とコミュニティ：ケーススタディ Planetary explorations and community: a case study

小林 直樹^{1*}, 村上 英記², 早川 雅彦¹
Naoki Kobayashi^{1*}, Hideki Murakami², Masahiko Hayakawa¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 高知大学理学部応用理学科
¹ISAS/JAXA, ²Dept. Applied Sciences, Kochi Univ.

惑星探査を効果的に進めるためには機器開発を進めるチームだけではなく、探査プロジェクトを取り巻く科学者コミュニティのあり方も重要な要素である。コミュニティ作りは探査そのものの将来計画とは直接には関係しないが、将来計画の実現に向けて或は実施される探査の科学成果、波及効果を考える上では大きな要素であろう。この発表では探査コミュニティ作りの取り組みとして二つの取り組みを紹介する。一つは惑星探査用の地震計の開発を進めているコミュニティであり、もう一つはこれまでの日本の探査である「はやぶさ」、「かぐや」のデータを使った実習会の取り組みである。

日本の地震学的な月惑星内部構造探査としては Lunar-A 計画があった。Lunar-A は槍型のペネトレータに短周期地震計を搭載し、そのペネトレータによる観測ネットワークを月面上に構築する計画であった。しかし、ペネトレータ技術の完成が難航したために計画自体は 2007 年に中止となった。開発した地震計の技術はメーカーによって防災用の短周期地震計として活用されているが、携わった理学研究者にとって厳しい結果であった。多額の出費が必要であり、野心的であるには技術的にも困難な目標となりがちな探査において予定通りプロジェクトが進行するとは限らない。そうした状況でも参加する研究者に実りがある開発体制が必要であろう。現在、我々は地震研究所を中心として月・火星探査用の広帯域地震計を開発している。Lunar-A の教訓から開発自体を探査に特化するのではなく、開発した技術要素が地球観測にも活かせるよう多面的な地震計開発チームを立ち上げた。チームの構成員は月・火星探査の地震計の開発者だけでなく、海底地震計、地上広帯域地震計の開発や計測に関わる研究者、地震解析や理論の専門家、比較惑星科学の研究者からなる。1、2ヶ月おきに開催している会議では開発している地震計の技術的な進捗だけでなく、月惑星探査のプロジェクトの動向や海底地震計プロジェクトの進捗、地震学、惑星科学のトピック的な研究や論文の紹介などを行っている。こうした議論を通して探査の道のりの途中で生まれてくる科学や技術を愉しむ活動を目指している。

もう一つの取り組みは月惑星探査データ解析実習会である。これまでの日本の固体系の月惑星探査の在り方を振り返るとプロジェクトチームとチーム周辺の地球惑星科学のコミュニティとは意識のギャップがあるように感じる。しかし、大規模な探査を推進するにあたっては母体となるコミュニティとの一体感のあるプロジェクトの進め方は必須であり、今後一層問われてくる。データ解析実習会はこれまでに取得した「はやぶさ」や「かぐや」のデータを多くの若い研究者、学生に触れてもらい、探査データから生まれてくる科学に興味を持ってもらい、将来惑星探査の担い手になる研究者の掘り起こしが狙いである。探査の中心人物とまでは行かなくても、実習会を通して月惑星の探査へのリアリティを実感できるようにしよう。また、次期小惑星探査、月探査を計画するにあたって、これまで人類が手にしたデータを十二分に解析し次なるプロジェクトに活かして行くのはプロジェクトチームと母体コミュニティの共通の義務であろう。データ解析実習会がその一助となればと願っている。しかし、「来る 10 年」で検討しているようなプランを今後 10 数年で実施していくには、実習会の活動だけではまだまだ不十分である。本発表では「はやぶさ」や「かぐや」のデータを利用し切るためにはどういう方策がありうるのか、それによって強いコミュニティをどう作って行くのかについて議論したい。

キーワード: 月惑星探査, コミュニティ, ルナ A, 広帯域地震計, データ解析, 実習会

Keywords: lunar and planetary explorations, community, Lunar-A, broadband seismometer, data analyses, school

ペネトレータ技術を応用した惑星探査ミッションについて Future prospect of planetary exploration by penetrator technology

白石 浩章^{1*}, 小林 直樹¹, 田中 智¹, 村上 英記², 藤村 彰夫¹

Hiroaki Shiraishi^{1*}, Naoki Kobayashi¹, Satoshi Tanaka¹, Hideki Murakami², Akio Fujimura¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 高知大学

¹ ISAS/JAXA, ² Kochi University

ペネトレータとは月や惑星の表面に高速貫入・設置することで観測を行うハードランディング型の観測プローブのことである。通常の軟着陸機(ランダー)に比べて小型・軽量化された衛星システムを実現することができ、一回のミッションで固体惑星表面の複数点に設置して地球物理観測網を広範囲で展開することができる。また、掘削装置を利用せずに表層下のその場観測を実現することができるため、探査機システムの小型・軽量化が要求される宇宙ミッションにおいて重要な観測手段に位置づけられてきた。そのため、諸外国でも惑星探査ミッションへ適用するための開発研究が長年行われてきているが、2014年に彗星探査を目指す欧州宇宙機関のRosettaミッション(加速度計と温度計を搭載し軟着陸機のアンカーの役割も担う)を除くとその有効性がいまだ宇宙実証されていない状況である。ペネトレータ技術の最も大きな開発要素は高速貫入に伴って発生する衝撃への耐性であり、ケース外套を含めた搭載機器を保護するための高度な艦装技術(ポッティングと呼ぶ)が求められる。地震計および熱流量計による内部構造探査を目的として旧LUNAR-A計画用に開発してきた月探査用ペネトレータでは、搭載機器の耐衝撃性について一定の見通しが立ったものの、重量・電力リソースの厳しい制約の中で実現したシステムであるため、将来の惑星探査ミッションに発展応用していくためにはさらに技術的課題を解決し、新たな科学観測機器も開発していく必要がある。例えば、2003年から2004年にかけてJAXA内外の専門家による一連の評価委員会においても技術開発と製造性に関する以下のような指摘がなされた。

(1) コンポーネント製造からポッティング工程終了まで約1年の長期間を要する。

(2) 現行仕様の充填剤および実装方法では、ポッティング工程中および貫入試験後に内部搭載機器を分解・調査することが困難である。

(3) 現行のCFRP製一体構造の搭載方式ではポッティング工程中および貫入試験後に一部の機器に不具合が発生すると、ペネトレータ全ブロックが以降の試験に使用できなく(使い捨てに)なるリスクを抱えている。

つまり、現状の製造工程と試験方法では試験回数が少なくなること、ターンアラウンドの期間が長くなること、試験前後の調査・改修が十分に実施できないことなどから開発の長期化、高コスト化、ひいては開発技術の信頼性低下を招く結果に至ったという指摘である。そのため、通常の宇宙衛星には適用されない貫入衝撃を模擬する試験装置を整備するとともに、搭載機器の製造工程と地上試験のターンアラウンドを短縮化することで多数回の検証機会を設けることが重要である。課せられる衝撃レベルや環境条件は探査目標とする天体とミッションを遂行する科学観測機器の組合せによって異なることが予想されるが、厳しい搭載環境条件を回避もしくは緩和する方策についても検討していく必要がある。本研究では、月探査用ペネトレータを技術開発し実際の宇宙ミッションへの適用を試みてきた経験をもとに、月以外の惑星天体を対象としたペネトレータ方式によるミッションを提案し、それぞれの科学目標を達成するための候補観測機器、新規開発要素および観測運用方法などについて検討を行った結果を報告する。

レーザー絶縁破壊分光観測による惑星表層物質の元素分析 Elemental analysis of planetary surface materials by laser-induced breakdown spectroscopy

石橋 高^{1*}, 亀田 真吾¹, 長 勇一郎², 杉田 精司³, 三浦 弥生⁴, 大野 宗祐¹, 荒井 朋子¹, 和田 浩二¹, 小林 正規¹, 千秋 博紀¹, 後藤 和久¹, 並木 則行¹, 松井 孝典¹

Ko Ishibashi^{1*}, Shingo Kameda¹, Yuichiro Cho², Seiji Sugita³, Yayoi N. Miura⁴, Sohsuke Ohno¹, Tomoko Arai¹, Koji Wada¹, Masanori Kobayashi¹, Hiroki Senshu¹, Kazuhisa Goto¹, Noriyuki Namiki¹, Takafumi Matsui¹

¹ 千葉工業大学・惑星探査研究センター, ² 東京大学・理・地球惑星科, ³ 東京大学・新領域・複雑理工, ⁴ 東京大学・地震研
¹PERC, Chitech, ²Dept. Earth. Planet. Sci., Univ. Tokyo, ³Dept. Complex. Sci. Eng., Univ. Tokyo, ⁴Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo

月惑星の固体系探査は一般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。日本の月惑星探査では「はやぶさ」, 「かぐや」がリモートセンシングで大きな成功を収めたばかりであるが, NASA/ESA が主導する火星探査ではその場観察の最終段階に入っており, サンプルリターンへ向けて着々と準備が進められている。月についても「かぐや」以降, 中国, インド, NASA が次々に探査機を打ち上げ, リモートセンシングでの観測はほぼ終了した。現在は各国ともその場観察とサンプルリターンの計画段階へ移行している。月・火星以外の天体についても, 遅かれ早かれ同じ段階を経て国際的動向が進むのは自明である。日本も次期月探査で初めて地球外天体への軟着陸を目指しているが, 搭載観測機器の開発は欧米に大きく遅れをとっている。われわれは, 将来の着陸機・ローバへの搭載が必須となるであろう, 大変重要な観測機器として, LIBSの開発を行っている。この意見書ではLIBSが実現する惑星表層物質の元素分析の科学について提案する。

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分かる」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。歴史上最も成功したサンプルリターンミッションであるアポロ計画の月岩石資料でさえ, 月隕石やリモートセンシングデータとの対比から, 月表側の限定的な領域のサンプルでしかないことが最近では理解されている。火星はさらに複雑で, 赤い惑星の多様な堆積岩は着陸地点毎に異なる姿をみせる。

従来の惑星探査の経験から, その場観察では複数点に着陸する必要性と, 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。殊に後者に関しては, 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, 簡易で効率的な光学分析機器が必須である。この点においてLIBSは(i)測定距離が1~10mと可変で, (ii)空間分解能が高く(1mm以下), (iii)測定時間が短い(数秒~数分以内)上に, (iv)多様な元素の定量分析が可能で(アルカリ元素, 軽元素, 希土類元素を含む), 且つ(v)試料の前処理が不要と, 非常に有効である。

火星の気候変動・進化史の解明にあつては, 着陸機・ローバ探査によって, 着陸地点とその周囲の領域において岩石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。その要請にLIBSは十分答えられる機器である。LIBSは, 岩石試料をレーザーで加熱・蒸発させ, 生成されたプラズマの輝線スペクトルを測定することで, その岩石試料の元素組成を計測する。それゆえLIBSは, 火星のみならず, 月や他の惑星上でも広範囲の領域に分布する岩石組成を測定することを可能である。また, レーザによるアブレーション効果があり, 岩石の表層数mmを覆っているダストコーティングを剥ぎ取って内部のフレッシュな岩石組成を計測することが可能である。同時に, LIBSは主要元素のみならず, 軽元素・揮発性元素の計測もできる。最近になってその存在が示唆されている火星のメタンの起源や火星生命(の痕跡)に迫れる。さらに, LIBSによる測定は他の機器による測定と組み合わせることで探査計画をより有意義なものとする。たとえば, ローバによる探査では, LIBSによって多少離れた地点の岩石元素組成の素早い計測を行うことで, ローバが進むべき興味深い地点の選定が可能となる。また, Ar-K年代測定を質量分析計で行う場合には, 十分な量のKが存在する地点に行く必要があるが, そのような地点をあらかじめLIBS測定によって見当がつけられる, という相補性がある。

火星着陸機・ローバ探査におけるLIBSによる測定によって以下のような貢献が期待される。

- (1.1) 堆積岩の組成および分布(層序)の測定と大気組成進化および水・二酸化炭素の行方
- (1.2) 火成岩の組成(安山岩か玄武岩か)の測定と地殻あるいはマントルからの脱ガス過程, 火星内部の酸化還元状態
- (1.3) 生命(の痕跡)および生命活動に必要な物質の検出

一方, 月表層での元素分析の科学目標は大きく, 下記の4つに分けることができる。

- (2.1) 月斜長岩質地殻の化学組成
- (2.2) 月バルクのアリカリ元素濃度決定への制約
- (2.3) 海の玄武岩流の垂直方向組成多様性の探査とマントル組成の推定
- (2.4) かんらん石の $Mg/(Mg+Fe)$ 比とかんらん石/斜長石の存在度決定

キーワード: 惑星探査, 元素分析, レーザー, 分光

Keywords: planetary exploration, elemental analysis, laser, spectroscopy

Japan Geoscience Union Meeting 2011

(May 22-27 2011 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2011. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS023-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 16:15-18:45

”Small is beautiful” planetary missions: 小型軽量多地点の化学探査が目指す惑星の化学と生物学 ”Small is beautiful” planetary missions

関根 康人^{1*}, 火原彰秀², 鈴木宏二郎¹, 杉田 精司¹, 松井孝典³
Yasuhito Sekine^{1*}, Akihide Hibara², Kojiro Suzuki¹, Seiji Sugita¹, Takafumi Matsui³

¹ 東大新領域, ² 東大生研, ³ 千葉工大惑星探査センター

¹Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. Tokyo, ²Inst. Industrial Sci., Univ. Tokyo, ³PERC, Chiba Inst. Tec.

Micro-Total Analysis System (micro-TAS) describes a miniaturized chip-sized device that automates all necessary steps for chemical analysis of a sample, such as sampling, transport, filtering, dilution, reactions, separation, and detection. Such micro-TAS technology has been originally developed in analytical chemistry and recently has started to be widely applied in many fields, e.g., medical care, marine technology, and police investigation. Because of its very small size, micro-TAS can be placed close to a sampling site, where human cannot reach easily. In this paper, we discuss possible applications of micro-TAS to space and planetary explorations. Together with our small and distributed FS landers, we propose a new type of planetary explorations with the aim of detection of biomarkers and volcanic gases on Mars, Titan and Enceladus.

キーワード: 惑星探査, 化学分析, 火星, タイタン, メタン, 火山

Keywords: planetary explorations, chemical analysis, Mars, Titan, methane, volcano

PPS023-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 16:15-18:45

内惑星系-小惑星帯領域の天体進化を探る探査の提案

Exploration of collisional history and material evolution in the inner region and the main belt of the solar system

平田 成^{1*}, 出村 裕英¹, 岡田 達明², 阿部 新助³, 荒井 朋子⁴, 佐々木 晶⁵

Naru Hirata^{1*}, Hirohide Demura¹, Tatsuaki Okada², Shinsuke Abe³, Tomoko Arai⁴, Sho Sasaki⁵

¹ 会津大学, ²JAXA, ³ 台湾中央大学, ⁴ 千葉工業大学, ⁵ 国立天文台

¹Univ. of Aizu, ²JAXA, ³NCU, ⁴Chiba Institute of Technology, ⁵NAOJ

小惑星探査機「はやぶさ」の重要な成果の一つは、小惑星イトカワが rubble-pile 構造を持っていたという発見である。これはイトカワが、より大きな小惑星が衝突破壊された後、その破片が再集積した天体である、ということの意味している。小惑星同士の大規模な衝突によって、catastrophic な破壊が生じると、その破片は多数の新しい小惑星となり、一部が再集積して rubble-pile 天体となる。小惑星帯ではこの現象によって初生時から現在の状態までサイズ頻度分布の進化が生じている。この進化過程を遡れば太陽系形成初期の小惑星帯小天体のサイズ頻度分布、すなわち原始太陽系の物質分布についての情報を得ることになる。これは、「なぜ小惑星は惑星になれなかったのか」という問いに答えることと等しい。

一方、隕石をはじめとする地球外物質のコレクションは大きく充実するようになったが、地球の原材料物質は何か、という地球惑星科学の基本的な問題にはまだわれわれは答えることができていない。現在までの隕石研究と地上観測、そして理論的検討の成果として、原始太陽系の中には日心距離に応じた化学組成の変化が生じていたと考えられるようになっているが、「はやぶさ」のサンプルリターン成功はこのような原始太陽系星雲における物質分布の再構築する上で大きな手がかりを与えたことになるだろう。

このような状況を踏まえて、われわれは次世代の探査計画として、太陽系の内惑星系?小惑星帯の初期物質分布とその後の物理的、化学的進化を捉えるための小惑星探査を提案する。系統的な小惑星の探査により、小惑星帯サイズ頻度分布進化モデルの構築と、惑星と小惑星の化学的多様性の起源を知るのがその目的である。

キーワード: 小惑星探査, 衝突進化, 物質科学, リモートセンシング, サンプルリターン

Keywords: Asteroid exploration, impact history, material science, remote sensing, sample return

PPS023-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 16:15-18:45

炭素と塩素含有物による月惑星探査

Lunar planetary exploration by carbon- and chlorine-bearing materials

三浦 保範^{1*}

Yasunori Miura^{1*}

¹ 山口大学

¹ Yamaguchi University

- 1) 月面の破碎岩には、炭素や塩素などの揮発性元素を多く残存する。
- 2) 炭素は、さまざまな陽イオン (Ca, Mg, Fe) と固体状態でマイクロなナノ組織を示す。
- 3) 塩素と微量重元素も、固体状鉱物岩石で破碎的な急冷組織中に残存している。
- 4) 大気のない月面には、惑星間衝突残物以外に、小惑星衝突と太陽風などの太陽からの飛来物の影響があり、炭素には特にその傾向がみられる。
- 5) 月の磁性鉱物や磁場に影響する、炭素含有鉱物の相変化により、月での磁性変化が新たに考えられる。
- 6) 炭素は多くのアポロ月面の衝突破碎岩に特異的に残存し、月の高地クラスト破碎岩の Ca に富む灰長石などにも残存している。
- 7) 今後月面探査では炭素と塩素の揮発性元素含有物の探査が、月の形成解明に重要である。
- 8) 地球に比べて無活動的な月内部での (月型火山性または月震性) 衝撃波爆発によるガス発生で陥没窪み構造の形成にも炭素含有物が関与していると考えられる。
- 9) この研究手法は、火星や小惑星探査やその他の惑星探査に応用可能なグローバルな探査である。

キーワード: 月探査, 炭素含有物, 塩素含有物, 磁性鉱物と磁場, 惑星間衝突, 太陽風飛来

Keywords: lunar exploration, carbon-bearing materials, chlorine-bearing materials, magnetic minerals and magnetism, planetary impacts, solar wind transportation