

## 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<sup>1\*</sup>, 亀田 真吾<sup>1</sup>, 長 勇一郎<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>3</sup>, 三浦 弥生<sup>4</sup>, 大野 宗祐<sup>1</sup>, 荒井 朋子<sup>1</sup>, 和田 浩二<sup>1</sup>, 小林 正規<sup>1</sup>, 千秋 博紀<sup>1</sup>, 後藤 和久<sup>1</sup>, 並木 則行<sup>1</sup>, 松井 孝典<sup>1</sup>

Ko Ishibashi<sup>1\*</sup>, Shingo Kameda<sup>1</sup>, Yuichiro Cho<sup>2</sup>, Seiji Sugita<sup>3</sup>, Yayoi N. Miura<sup>4</sup>, Sohsuke Ohno<sup>1</sup>, Tomoko Arai<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Masanori Kobayashi<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Kazuhisa Goto<sup>1</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Takafumi Matsui<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> 東京大学・理・地球惑星科, <sup>3</sup> 東京大学・新領域・複雑理工, <sup>4</sup> 東京大学・地震研  
<sup>1</sup>PERC, Chitech, <sup>2</sup>Dept. Earth. Planet. Sci., Univ. Tokyo, <sup>3</sup>Dept. Complex. Sci. Eng., Univ. Tokyo, <sup>4</sup>Earthquake 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