

## 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 analyzer for landed lunar and planetary explorations: Laser-induced breakdown spectrometer (LIBS)

石橋 高<sup>1\*</sup>, 亀田 真吾<sup>2</sup>, 小林 正規<sup>1</sup>, 並木 則行<sup>1</sup>, 荒井 朋子<sup>1</sup>, 和田 浩二<sup>1</sup>, 千秋 博紀<sup>1</sup>, 大野 宗祐<sup>1</sup>, 長 勇一郎<sup>3</sup>, 杉田 精司<sup>4</sup>  
Ko Ishibashi<sup>1\*</sup>, Shingo Kameda<sup>2</sup>, Masanori Kobayashi<sup>1</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Tomoko Arai<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Sohsuke Ohno<sup>1</sup>, Yuichiro Cho<sup>3</sup>, Seiji Sugita<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/理学部, <sup>3</sup> 東京大学/理学系研究科, <sup>4</sup> 東京大学/新領域創成科学研究科  
<sup>1</sup> Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup> School of Science, Rikkyo University, <sup>3</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>4</sup> Graduate School of Frontier Science, The University of 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) を提案し、昨年の連合大会の本セッションにおいて、提案の概要の説明を行った。今回はその後の進捗状況の報告を行う。

LIBSはレーザーと分光器を用いた元素分析装置である。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。プラズマブリューム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。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が、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の持つこれらの特徴により、LIBSは月・惑星着陸探査における強力な元素分析ツールになる可能性を持っている。実際に現在火星を探査中の Mars Science Laboratory には LIBS が搭載されており、これが宇宙における初の LIBS の使用となった。今後の着陸惑星探査において、LIBS はスタンダードな元素分析装置になってゆくと考えられる。

現在我々のグループでは、主に着陸月探査を念頭に置いて LIBS の開発を進めている。昨年までに、LIBS の基本設計、測定距離可変光学系の光学設計を終えた。それに平行して、LIBS による元素組成定量手法の改良 (マトリックス効果による定量精度低下の克服) も行った。昨年は、レーザーおよび分光器のスペックの見直しを行い、さらなる軽量化の目処が付き、現在は総重量 3.5 kg を目指して開発を進めている。また昨年は、LIBS の試作機を用いて 2 種類のフィールド試験を行った。一つは、野外での元素組成測定試験 (千葉工大が担当)、もう一つは野外での LIBS 光学系のローバ搭載試験 (立教大が担当) である。フィールド試験は、いずれも伊豆大島の裏砂漠 (三原山の麓) で行った。

野外での元素組成測定試験は、小型のポータブル LIBS を用いて行った。このポータブル LIBS は、3 mJ/pulse のパルスレーザーと、対物距離 50 mm の集光光学系を持つ近距離測定用の LIBS である。あらかじめ実験室において火成岩のスタンダード試料の測定を行い、元素濃度定量のための回帰モデルを作成した。この LIBS を用いて、フィールドにおける自然地形 (転石や溶岩流など) の元素組成測定試験を行った。太陽光のもとでの測定であったが、短時間で高い S/N 比を持つスペクトルが得られた。これらのスペクトルを解析することで、玄武岩として妥当な元素組成が得られた。ただし、解析のエラーは大きく、これは回帰モデル作成に用いたスタンダード試料数が少ないことに起因すると考えられる。スタンダード岩石試料を充実させ、定量精度を向上させることが今後の課題である。野外での LIBS のローバ搭載試験では、対物距離可変型 LIBS の光学系の試作機をローバ (Micro 6, JAXA) に搭載し、遠隔操作による自動焦点合わせ試験、レーザー照射試験を行った。

今後は、対物距離可変型 LIBS の試作機をローバに搭載し、測定地点の選定、自動焦点合わせ、レーザー照射、スペクトル取得、元素組成測定の一連の流れを実施する予定である。それを通して、LIBS 測定運用手順の確認やローバ搭載時の自然地形での元素組成測定の確認などを行いたいと考えている。

キーワード: 着陸探査, 元素分析装置

Keywords: landed exploration, elemental analyzer