

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^{1*}、並木 則行¹、荒井 朋子¹、小林 正規¹、千秋 博紀¹、和田 浩二¹、大野 宗祐¹、亀田 真吾²、長 勇一郎³、杉田 精司⁴
ISHIBASHI, Ko^{1*}, NAMIKI, Noriyuki¹, ARAI, Tomoko¹, KOBAYASHI, Masanori¹, SENSHU, Hiroki¹, WADA, Koji¹, OHNO, Sohsuke¹, KAMEDA, Shingo², CHO, Yuichiro³, SUGITA, Seiji⁴

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

¹PERC, Chitech, ²Dept. Phys., Col. Sci., Rikkyo Univ., ³Dept. Earth. Planet. Sci., Univ. Tokyo, ⁴Dept. 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 μm ～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