

## 惑星探査用レーザーパルス元素計測器の基礎開発実験：照射周波数の及ぼす影響

## An experimental study on development of a LIBS instrument for planetary explorations: effects of pulse repetition rate

# 長 勇一郎 [1]; 丸山 智志 [2]; 鈴木 絢子 [3]; 黒澤 耕介 [4]; 鎌田 俊一 [5]; 杉田 精司 [4]; 小澤 一仁 [6]; 金子 隆之 [7]; 松井 孝典 [8]

# Yuichiro Cho[1]; Satoshi Maruyama[2]; Ayako Suzuki[3]; Kosuke Kurosawa[4]; Shunichi Kamata[5]; Seiji Sugita[4]; Kazuhito Ozawa[6]; Takayuki Kaneko[7]; Takafumi Matsui[8]

[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理・地惑; [3] 東大・地震研; [4] 東大・新領域・複雑理工; [5] 東大・理・地惑; [6] 東大・理系・地惑; [7] 東大・地震研・火山センター; [8] 東大・院・新領域

[1] Earth and Planetary Science, Tokyo Univ.; [2] EPS, S, UT; [3] ERI, Univ. of Tokyo; [4] Dept. of Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo; [5] Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo; [6] Univ. Tokyo, EPS; [7] Volc. Res. C., ERI, Univ. Tokyo; [8] Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

これまでの日本の惑星探査は、周回衛星やフライバイによるリモートセンシング観測が主流であった。しかしハヤブサの小惑星探査を皮切りに、月や火星などへも着陸探査機を送る計画が検討されつつある。このとき、着陸地点周辺の岩石の元素組成を簡便かつ正確に計測する測器は非常に重要となる。元素組成計測方式には幾つかの種類があるが、その中でも迅速にかつ着陸地点周辺を広い範囲に計測できるのが LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) と呼ばれる方法である。LIBS とはレーザー光線を標的物体に照射したときに生じるプラズマ蒸気雲の発光を捉え、分光元素分析を行う手法である。LIBS の特徴として、離れたところにある試料の測定が可能であること、迅速な分析が可能であること、化学的な前処理の必要がないこと、及び岩石内部の層序分析ができてくることが挙げられる。一方で、低大気圧下においては発光強度が低下していること [1] など、未だ発展の余地が残されているものも多い。その他の例として、レーザー光のパルス照射周波数とプラズマ発光強度の関係について、Kamata et. al [2] は以下のことを明らかにした。(1) レーザー照射周波数が 1 Hz の場合と 10Hz に上げた場合で比較すると、岩石種に応じて効果の大小こそあれ、1.1 倍から 10 倍の範囲でプラズマ蒸気雲の総発光強度が増加する。(2) 照射周波数が 1 Hz では見えなかった輝線 (主にイオンの輝線) が、照射周波数を 10 Hz に上げると検出される。(3) 蒸気雲の発光強度が高いほど元素組成測定精度が向上する、などである。従って元素分析精度の向上のためには、レーザー照射周波数を上げることが有力な手段であると考えられる。だが、現状では発光強度増大の直接的な原因は特定されていない。この物理メカニズムを理解することは、将来の LIBS の性能向上のために、また工学的なコストを考慮した上で、最大の科学的成果をあげるパルス周波数を与えて搭載機器の基本的な性能を決定するために、極めて重要な課題である。

レーザーのパルス間隔 (0.1- 1 秒) はプラズマ蒸気雲の寿命 (1 - 1000 マイクロ秒) よりも遥かに長いことから、照射周波数の影響は標的試料の温度上昇を介してプラズマ蒸気雲にもたらされる可能性が高い。標的温度の上昇は以下を引き起こす可能性がある。(1) 蒸気雲の加熱 (2) 蒸気雲のイオン化率の増加 (3) 蒸発質量の増加である。そこでまず、レーザーパルス照射周波数を 0.1 Hz から 10 Hz まで段階的に変えて標的に照射し、それぞれにつき赤外線カメラでレーザー照射部の温度変化を 10 秒間に亘って観察し、温度変化を定量的に測定した。次に、(1) を検証するために、チタン鉄鉱を標的として Fe 原子及び Ti 原子の電子温度の測定を Boltzmann プロットにより行った。また、(2) を検証するために蛇紋岩の Mg+輝線 (448 nm) を用いて Stark 広がりを測定し、電子密度を算出した。これらの測定を、レーザー照射周波数は 1 Hz から 10Hz まで変えながら行った。

予備的な実験の結果、(i) レーザー照射部の平衡温度は、照射周波数が 1 Hz のときは約 2000 K であるのに対し、10 Hz では約 10000 K であること、(ii) Fe 原子、Ti 原子の電子温度はいずれの周波数に於いてもおよそ  $6800 \pm 1000$  K であり、照射周波数を変えても誤差の範囲で一致すること、(iii) 1 Hz と 10Hz を比較すると発光強度は 3 倍に増加したにもかかわらず、プラズマのイオン化率の変化は高々 20% 程度に留まることが示された。

照射周波数の違いによって標的の温度が 1000 K 異なることは、標的の蒸発効率を大きく高める可能性がある。しかしながらプラズマ温度とイオン化率の変化は大きくなく、今回の実験ではそれらによって照射周波数の増加に伴う発光強度の増大を説明するには至らなかった。これらの結果は、標的温度の上昇による蒸発質量の増加が、レーザー照射周波数の増加に伴うプラズマ蒸気雲発光強度の増大に寄与する可能性を示唆している。

## 参考文献

[1] Kagawa and Idris, J. Plasma Fusion Res. 83, 401-412, (2007)

[2] Kamata et al., LPSC, (2008) in press