

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820410

研究課題名(和文)高繰り返し周波数パルスレーザーによる宇宙デブリ除去

研究課題名(英文)Space debris removal using high repetitive pulse laser

研究代表者

横田 茂 (Yokota, Shigeru)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：30545778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スペースデブリ除去のため、最も有効な手段の1つはレーザーアブレーションを用いる方法である。1発で大きなエネルギーのパルスレーザーを照射するよりも、高繰り返し周波数パルスレーザーを用いて最適なエネルギー密度で何度も照射した方が有利と考えられるが、何度も照射すると徐々に発生力積が減少したため、この原因を追究した。結果として、発生力積を制限する原因は表面形状の変化によるエネルギー密度の変化および粒子の広角噴射であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：One of the most hopeful method to remove space debris is the method using laser ablation. High repetitive pulse irradiation with the optimum laser energy density is expected to be more effective to produce large impulse than single pulse irradiation with giant laser energy. However, impulse decreases as the laser pulse number increases. As a result of this study, it was found that the main causes of the decrement were the decrement of the laser energy density at the irradiation spot and wide spreading particles both which were caused by the change of surface shape.

研究分野：宇宙推進工学

キーワード：レーザー推進 アブレーション スペースデブリ除去

### 1. 研究開始当初の背景

故障した宇宙機の破片などの宇宙ゴミ『スペースデブリ』は、高速で地球近傍を周回し、その数は  $10^7$  個を超えている。これは宇宙機にとって大きな脅威であり、スペースデブリ除去は緊急課題である。このデブリは、大きさ次第で回避策が異なるが、1-10cmのものについては、現時点で有効な回避策がない。

現在、この 1-10cm の大きさのデブリを回避する最も有効な手段と期待されるのが、レーザーアブレーションによるデブリの除去である。これは、デブリにレーザーを照射して表面の一部を蒸発させ（アブレーション）、その発生したガスによってデブリに推力を発生させ、デブリの軌道を変更させて大気圏に落とす、というものである。

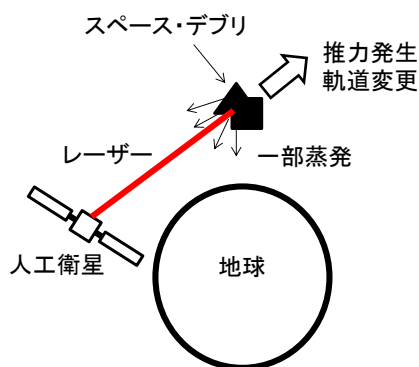


図1 レーザーアブレーションによるスペースデブリ除去

このレーザー照射によるスペースデブリの除去は 1990 年代からさかんに研究され、これらの研究から、今後開発されるであろう数十 kW 級のレーザーを照射すれば、『理想的には』レーザーによってデブリの除去が充分可能、という結論が得られた。一方で、照射するレーザーエネルギー密度が大きすぎると、かえって発生する力積が少なくなることもわかってきており、従って、実は単純に大出力でパルスレーザーを集光して小さなデブリに照射しても、エネルギー密度が大きすぎるため、必ずしも除去できる力積が発生できるわけではない。

従って、1 発で大きなエネルギーのパルスレーザーを照射するよりも、高繰り返し周波数パルスレーザーを用いて、最適なエネルギー密度で何度も照射したほうが有利であると考えられる。

そこで、この検証試験を行ったところ、条件によっては、照射面積を一定にして、あるエネルギーで 1 発照射するよりも、その 1/4 のエネルギーで 4 発照射した方が、トータルで発生する力積が 30% 近くも高くなることがわかった。一方で、何発もレーザー照射を繰り返すと徐々に発生力積が減少してしまい、かえって不利になることもわかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、高繰り返し周波数のパルスレーザーを用いた場合、ターゲットのアブレーションによる力積発生がどのような条件で制限されるのか調べ、頭打ちになるメカニズムを解明し、その制限を克服する指針を得ることである。

### 3. 研究の方法

まず、レーザー照射回数の増加に伴う発生力積の収束が、レーザーエネルギー、レーザー照射周波数によってどう変化するのか、その特性を明らかにする。これにより、どのパラメータで比較するのが最適かも明らかにする。

この結果を元に、力積が制限される原因を追求する。

レーザー照射回数増加に伴い発生する力積合計が収束する、すなわちある一定回数以上レーザーを照射しても力積に寄与しない理由として、エネルギーの変換過程を考えると、

①発生したガス（プラズマ）でレーザーが吸収・散乱され、レーザーが徐々にターゲットまで届かなくなる

②ターゲットまでは届いていても、表面の形状や状態変化等によって発生するガス量が減少する

③ガス自体は発生しているが、表面の形状等によってガスが広角に広がるため力積が減少する

の組み合わせが考えられる。このうち、どれが支配的な要因であるのか、明らかにする。

①については、ガスの発生有無によって力積が変化するかを調べることにする。もし変化した場合は、レーザーの反射光強度を計測することで反射・散乱光の割合を、また、二波長マッシュェンダー法にてガスおよびプラズマ数密度分布を計測し、レーザー吸収量を推算する。②の検証のために、ターゲットの形状と発生力積の関係性を探る。ターゲットの形状には電子顕微鏡を用いる。③については力積そのものの計測および可視化によって検証を行う。

### 4. 研究成果

実験系は図2の通りである。レーザー光を真空チャンバの中（排気量 2000L/s のターボ分子ポンプによって  $10^{-3}$  Pa にまで減圧されている）に誘導し、ターゲットとなる部材に照射した。本研究では宇宙機の部材として多用されるアルミニウムをターゲットとした。力積の計測には、図3に示す振り子型計測装置を用いた。

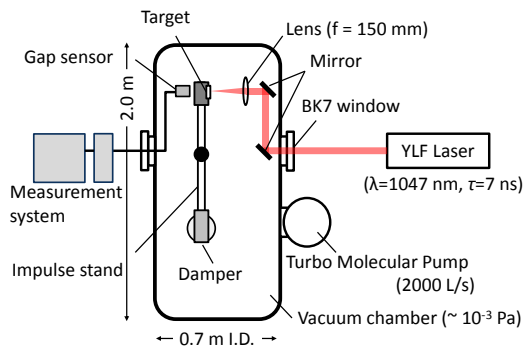


図2 実験系概略図

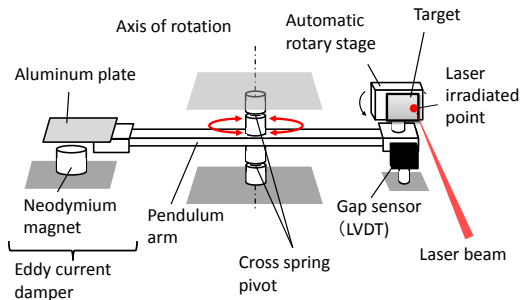


図3 振り子式力積計測装置

この結果、以下の成果を得た。

まず、照射回数を重ねるにつれ、エネルギーにかかわらず、発生力積が収束することがわかった。その根拠となるのが図4に示すレーザー照射回数に対する発生力積の大きさである。

次に、発生力積減少の原因は、アブレーションガスによるレーザー光の吸収や散乱ではないことも分かった。図4に示す白抜きと黒塗りのシンボルは、それぞれ1バーストあたりのレーザー照射回数が100回と500回のケースを示す。100回ずつ5回に分けても、500回一度に照射しても合計の力積はほぼ同じであった。すなわち、レーザーの軌道上のガスの有無にかかわらず、合計の力積は同じであった。

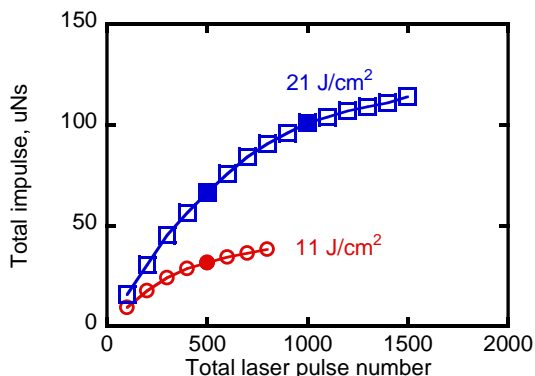


図4 レーザー照射回数に対する合計力積

また、発生力積はレーザー照射部の温度にもおそらく寄与しない。図5にレーザー照射

周波数に対する発生力積の大きさを示す。この図の通り、発生力積の大きさは周波数にほぼ寄与しない。すなわち、発生したガスが真空中に拡散していく時間、温度が部材に伝導していく時間にかかわらず、発生力積が変化しなかったことを意味している。

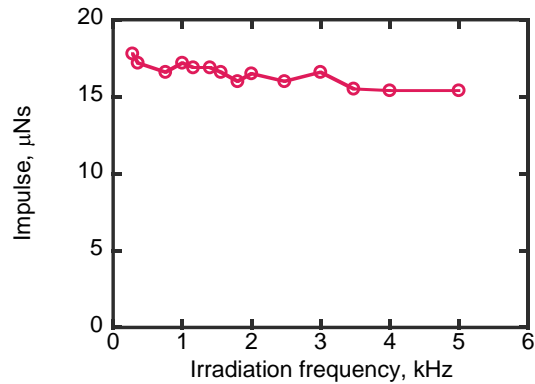


図5 レーザー照射周波数に対する発生力積の大きさ

発生力積を制限する最たる原因はおそらく表面形状の変化である。すなわち、レーザーアブレーションの発生により徐々に表面が侵食されていくが、これによりレーザー照射部におけるレーザーの入射角が垂直ではなくなるため（図6：レーザー照射部クレーターの断面図参照）、レーザーのエネルギー密度が下がる。また、レーザー照射部のクレーターの深さが深くなり、形状が平面ではなくなるにつれ、分子、粒子が広角に散乱する。図7に示すのはレーザー照射部のクレーター付近の様子であり、照射回数を重ねるにつれて、クレーター付近に飛び散った粒子が再付着している様子が見て取れる。

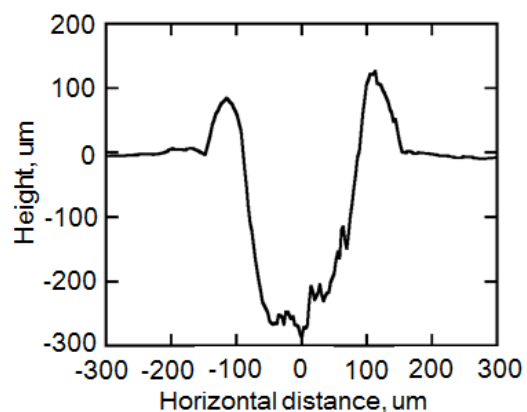
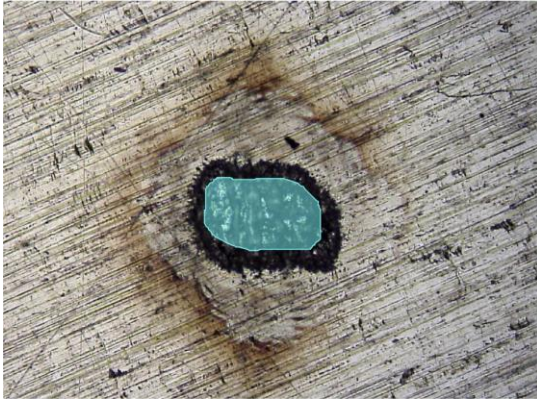
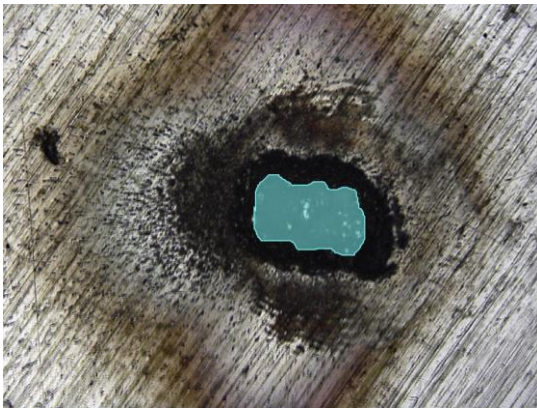


図6 レーザー照射部クレーターの断面



(a) 100 回照射時



(b) 500 回照射時



(c) 800 回照射時

図7 レーザー照射部

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) H. Tsuruta, B. Wang, Z. Wang, S. Yokota, and A. Sasoh “Repetitive Pulse Performance of One-Micrometer Laser-Ablation Propulsion onto Aluminum,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 6, pp. 1485-1489, 2014, 査読あり.

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 鶴田久, 横田茂, 佐宗章弘, 繰返しレーザーパルスによる推進力積の発生, レーザー学会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場 (福岡), 2015 年 1 月 20-22 日.

- (2) 鶴田久, 王仲遠, 王彬, 横田茂, 佐宗章弘, 8kHz パルス照射時のアルミニウムのアブレーション力積特性, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, ISAS/JAXA (神奈川), 2014 年 1 月 16-17 日.

- (3) 鶴田久, 王仲遠, 王彬, 横田茂, 佐宗章弘, スペースデブリ除去を志向した高繰返しパルス照射によるレーザーアブレーション力積特性, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 米子コンベンションセンター (鳥取), 2013 年 10 月 9-11 日.

- (4) N. Hasegawa, S. Yokota, and A. Sasoh, “Single-Plate-Imaging, Two-Wavelength, Mach-Zehnder Interferometer”, 29th International Symposium on Shock Waves, Madison, WI, USA, July 14-19, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横田 茂 (YOKOTA, SHIGERU)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 30545778