

令和 6 年 4 月 3 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02348

研究課題名（和文）連続レーザーアブレーションによる浮遊スペースデブリ除去法に関する研究

研究課題名（英文）Space debris removal using continuous laser ablation

研究代表者

森 浩一（Koichi, Mori）

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90375121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スペースデブリの軌道変換に関して、2つの目的：(1)低パワー密度の連続レーザー光による推進力を定量的に計測する、(2)溶融状態の固体材料にレーザーを照射した際に生じる推進力を計測することが目的である。結果として、以下のような成果を得た。
(1)新しい静電浮遊装置を作製し、電気・熱・力学的に周囲から絶縁された固体材料にレーザービームを照射し、発生する推力を計測することに成功した。
(2)真空中で溶融状態の金属材料（ジルコニウム、ステンレス鋼、チタン）に低パワー密度連続レーザー光を照射した際に生じる推力計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)静電浮遊装置を用いて外力を定量的に計測する手法を確立した。
(2)本研究の成果により、固体ターゲットのレーザー照射時の運動について、ターゲット表面の昇華に伴うアブレーション推力を加味した予想が可能となった。これは3Dプリンターなど、粉体へのレーザー照射を行う機器などの挙動をより精密に予測することに役立つ。
(3)理論的には、真空中なら、100W程度の比較的低パワーのレーザー装置を用いて、フォトンの運動量の10000倍程度の推力を発生できる見込みだが、現状は100倍程度に留まる。今後の継続的な研究により飛躍的性能向上が期待できる成果を得た。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this study are (1) To measure the thrust force generated when a low-power-density continuous-wave-laser beam is irradiated on a solid material, (2) To measure the thrust force generated when a laser beam is irradiated on a molten metal droplet. Consequently, we obtained the results as follows:

(1) A electrostatic levitation furnace is newly developed to measure the laser-driven thrust force.
(2) Using a electrostatic levitation furnace, the laser-driven thrust force generated on molten metals are measured for the first time in vacuum.

研究分野：航空宇宙推進工学

キーワード：スペースデブリ

1. 研究開始当初の背景

スペースデブリは宇宙開発の大問題である。人工衛星や宇宙ステーションの安全性・信頼性は、増え続けるスペースデブリによって脅かされている。直径 10cm 以上のデブリは、地上からの観測によって軌道が特定されており、マニューバーによる衝突回避が行われている。しかし、10cm 以下の小型のスペースデブリは、地上から

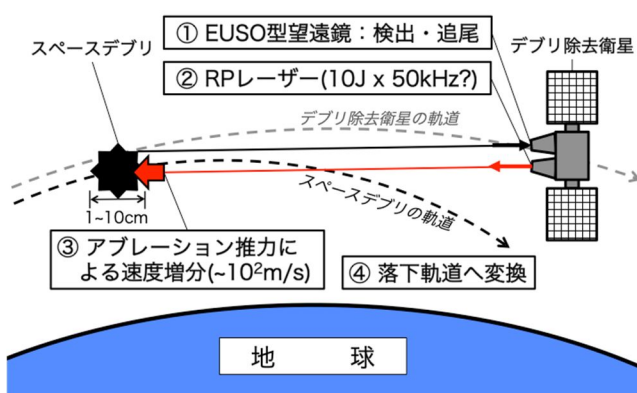


図1 スペースデブリ・レーザーナッジ概念図

からの検出が難しいため、現状では受動的な防護に頼っている。スペースデブリがこのまま増え続ければ、今のような対応策では追いつかなくなることから、能動的にスペースデブリを減らす方法が模索されている。特に小型のデブリ除去に効果があると期待されている方法が、レーザーナッジ(図1)である。デブリに遠隔からレーザービームを照射し、表面を昇華(アブレーション)し、その反力によって軌道変換する。2015年頃には、理化学研究所の戒崎らは、EUSO型超広角望遠鏡を用いて直径1-10cmのデブリを検出・追尾し、繰り返しパルス(Repetitive Pulse, RP)レーザー(一発あたりのパルスエネルギー: 10J, 繰り返し周波数: 50kHz, 時間平均パワー500kW)をこれに照射して速度増分 $\Delta V \sim 10^2 \text{m/s}$ を与えるというシナリオを提案した。[R1]

このようなレーザーナッジのミッション・シナリオはいくつか提案されているが、**余剰熱によるデブリの融解**が考慮されていない。真空中でのレーザーアブレーションにより発生できる単位レーザーパワーあたりの推力 C_m は、10N/MW程度であることが、これまでの研究からわかっている。一方、デブリを構成する材料の単位質量あたりの融解エネルギーを ϵ_{melt} とすると、デブリの全質量が融解するまでに発生できる速度増分は、 $\Delta V_{\text{max}} = C_m \epsilon_{\text{melt}}$ として見積もられる。デブリの代表的な材料はアルミ合金であるので、例として標準大気下のアルミニウムの値: $\epsilon_{\text{melt}} = 0.9 \text{MJ/kg}$ をこの式に代入すると、 $\Delta V_{\text{max}} \sim 9 \text{m/s}$ となる。粗い見積もりではあるが、必要な速度増分 $\Delta V \sim 10^2 \text{m/s}$ よりも一桁以上小さい。では、**液化したデブリ(=液滴)にRPレーザー光を照射すると何が起きるのか?**

”Laser impact on a drop”(単発のパルスレーザーを照射した際の液滴の挙動)は、流体力学における最近の興味深いトピックの1つである。[R2-R5] レーザーインパクトを受けた後の液滴の挙動は、時間スケール St とインパクト強さを表す Ma という2つのパラメタによって大きく異なる(図2)。[R2] 強圧縮性の領域は、例えば、パルス幅がフェムト秒程度の超短パルスレーザーを用いて実現される。液滴内部に強力な衝撃波が伝播し、キャビテーションが発生、最終的に液滴が細かい微粒子にバラバラに分解する様子が観測されている。[R3] 一方、弱圧縮性の領域は、パルス幅が $1 \mu\text{s}$ 程度と比較的長い CO_2 レーザーなどで実現される。この場合、液滴は、円盤状に変形した後、外縁部で分裂する。[R4, R5] 一方、非圧縮性領域は定常(CW)レーザーなどで、緩やかに加熱す

ること実現できると考えられるが、既往研究はない。液滴の表面張力が復元力として働き、大規模な変形が抑制されると予測される。

レーザーナッジのミッション・シナリオでは、RPレーザーの適用が想定されてきた。1パルスあたりの典型的な条件は、液滴レーザーインパクトの弱圧縮性に相当する。しかし、**RPレーザー、つまり複数**

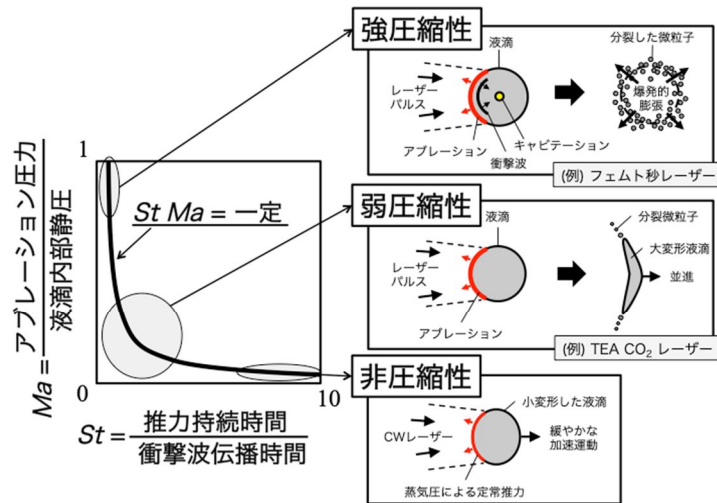


図2 液滴レーザーインパクト：圧縮性の程度に伴って卓越する現象は劇的に変化する

パルスを連続的に照射した際の推力発生と破壊のダイナミクスについては、これまでに研究がなく、熱流体力学的見地から理解する必要がある。 さらに、”Laser impact on a drop”に関する知見は、**デブリ除去の新たな方法**をも示唆している。強圧縮性の現象を利用して、極短パルス光を連続的に照射しデブリを粉砕する方法が考えられる。では、この**デブリ粉砕法**を実現するには、どのようなレーザーの条件が必要か？別の方法としては、非圧縮性の極限として、CWレーザーを用い、長時間・低いパワーでデブリを加熱することで、分裂を避けながら所定速度増分を与える、いわば**静的加速法**が考えられる。この場合、液滴内部の伝熱が重力の影響を受ける可能性が考えられる。このことが、推力発生や液滴の変形にどのような影響を及ぼすだろうか？いずれの方法に関しても、その実現要件を明らかにする必要がある。

[R1] Acta Astronautica 112 (2015) 102-113. [R2] J. Fluid Mech. 828 (2017) 374-394. [R3] Phys. Rev. E 95 (2017) 031101(R). [R4] Phys.Rev.Appl. 6 (2016) 014018. [R5] https://www.youtube.com/watch?v=Oog-DZ_Kti4

2. 研究の目的

- (1) 低パワー密度の連続レーザー光によるアブレーション推進力を計測すること。
- (2) 溶融状態の金属にレーザーを照射した際に生じる推進力を計測すること。

3. 研究の方法

- (1) 宇宙空間を浮遊するスペースデブリを模擬するために、真空中において熱・電気・力学的に孤立した、つまり、何とも接しない環境を再現する静電浮遊法を用いて、レーザーアブレーションなどの、外部からの作用によって生じる微小な力を精密に計測できることを実証する。
- (2) 低パワー密度におけるレーザーアブレーションによって生じる微小推力計測を実現するために、資料の位置決め・座標計測の精度を向上させた静電浮遊装置を新たに開発して用いる。

4 . 研究成果

本研究では、スペースデブリの軌道変換に関して、結果として、以下のような成果を得た。

- (1) 静電浮遊装置を用いて外力を定量的に計測する手法を確立した。[R6]
- (2) 新しい静電浮遊装置を作製し、電気・熱・力学的に周囲から絶縁された固体材料にレーザービームを照射し、発生する推力を計測することに成功した。[R7]
- (3) 真空中で熔融状態の金属材料（ジルコニウム、ステンレス鋼、チタン）に低パワー密度連続レーザー光を照射した際に生じる推力計測に成功した。（論文投稿中）

本研究の成果により、固体ターゲットのレーザー照射時の運動について、ターゲット表面の昇華に伴うアブレーション推力を加味した予想が可能となった。これは3Dプリンターなど、粉体へのレーザー照射を行う機器などの挙動をより精密に予測することに役立つ。また、低パワー密度のレーザーアブレーション推進の数値シミュレーションを行い、本研究で得た結果との比較を進めているが、シミュレーションの結果によると、真空中なら、100W程度の比較的lowパワーのレーザー装置を用いて、フォトンの運動量の 10^4 倍程度の推力を発生できる見込みを得ている。しかし、本研究で得られた推力は、フォトンの運動量の 10^2 倍程度に留まる。今後の継続的な研究により飛躍的性能向上が期待できる。

[R6] 秋田智也, 古田作, 森浩一, 小山千尋, 石川毅彦, 「静電浮遊炉を利用した高温スペースデブリの模擬とそれに作用するレーザーアブレーション推力の計測」航空宇宙技術, Vol.21, pp.48-52, 2022.

[R7] Koya UEDA, Koichi MORI, Development of an Electrostatic Levitator for Measurements of Thrust by Laser Ablation, International Journal of Microgravity Science and Application, 2023, 40 巻, 3 号, p. 400303-, 公開日 2023/07/31, <https://doi.org/10.15011/jasma.40.400303>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akita Tomoya, Furuta Tsukuru, Mori Koichi, Koyama Chihiro, Ishikawa Takehiko	4. 巻 21
2. 論文標題 The Simulation of a High-temperature Space Debris Using an Electrostatic Levitation Furnace and the Measurement of the Laser-ablation-thrust	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 48 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.21.48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koya UEDA, Koichi MORI	4. 巻 40
2. 論文標題 Development of an Electrostatic Levitator for Measurements of Thrust by Laser Ablation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Microgravity Science and Application	6. 最初と最後の頁 400303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15011/jasma.40.400303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 皆川尚樹, 森浩一(大阪公立大学), 石川毅彦, 小山千尋 (JAXA)
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いた模擬スペースデブリに発生するレーザーアブレーション推力の測定
3. 学会等名 日本マイクロ重力応用学会 第34回学術講演会 (JASMAC-34), 名古屋市立大学, 2022.9.16.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 皆川尚樹, 森浩一, 石川 毅彦, 小山千尋
2. 発表標題 Investigation for the material dependence of laser ablation thrust using electrostatic levitation furnace
3. 学会等名 The 2022 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田滉也、森浩一
2. 発表標題 レーザーアブレーション推力測定用静電浮遊炉の開発
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichi Mori, Minagawa Naoki(Osaka Metropolitan University), Koyama Chihiro, Ishikawa Takehiko(JAXA)
2. 発表標題 Material dependence of the propulsion performance by a very weak laser ablation
3. 学会等名 AJCPP2023, Kanazawa, Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森浩一
2. 発表標題 レーザーローンチシステム
3. 学会等名 日本航空宇宙学会関西支部航空宇宙懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森浩一
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いた模擬スペースデブリへのレーザーアブレーション推力計測実験
3. 学会等名 応用物理学会PE分科会プラズマ新領域研究会「ピーミング推進の最新動向」(オンライン, 2022.3.7) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 智也, 古田 作, 森 浩一
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いた金属液滴の熱・流体連成現象の観察
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 智也, 森 浩一, 石川 毅彦, 小山 千尋
2. 発表標題 静電浮遊炉を利用した模擬スペースデブリの低パワーCWレーザーアブレーションによる推力計測実験
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会, オンライン, 2021.11.9-12.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 皆川尚樹, 森浩一, 秋田智也, 石川毅彦, 小山千尋
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いたCWレーザー照射による模擬スペースデブリのレーザーアブレーション推力の計測
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森浩一
2. 発表標題 レーザーローンチシステム
3. 学会等名 日本航空宇宙学会関西支部航空宇宙懇談会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森浩一
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いた模擬スペースデブリへのレーザーアブレーション推力計測実験
3. 学会等名 応用物理学会PE分科会プラズマ新領域研究会「ピーミング推進の最新動向」(オンライン, 2022.3.7)(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 智也, 古田 作, 森 浩一
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いた金属液滴の熱・流体連成現象の観察
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 智也, 森 浩一, 石川 毅彦, 小山 千尋
2. 発表標題 静電浮遊炉を利用した模擬スペースデブリの低パワーCWレーザーアブレーションによる推力計測実験
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会, オンライン, 2021.11.9-12.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 皆川尚樹, 森浩一, 秋田智也, 石川毅彦, 小山千尋
2. 発表標題 静電浮遊炉を用いたCWレーザー照射による模擬スペースデブリのレーザーアブレーション推力の計測
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------