

令和元年6月1日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14503

研究課題名（和文）ナノ粒子を用いた定常レーザーデトネーション波

研究課題名（英文）continuous laser detonation wave using nano particles

研究代表者

森 浩一（MORI, KOICHI）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90375121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、レーザーのエネルギーを、微小スケールの固体を介して気体、特に高速気流の内部エネルギーに変換する方法を模索したものである。様々な媒介物質を探索した結果、マイクロスケールのサイズを有するカーボンファイバーからなる低密度多孔質を介したエネルギー変換に着目し、これについてエネルギー変換効率と、これを決定する物理機構の解明を行う実験的研究、並びに、理論的研究を進めた。実験の範囲では最大20%程度のエネルギー変換効率で、気体の温度を1500K程度まで加熱することに成功した。理論的には効率は80%程度まで向上できる見込みを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光エネルギーを気体のエネルギーに変換するメカニズムとして、本研究の多孔質を用いた方法は、これまでに研究例がない。この方法は、特に高温かつ高いレイノルズ数の流れへの適用に有効であり、応用としては、太陽光熱発電や、輻射エネルギーの流体の内部エネルギーへの回生などに用途が期待できる。熱工学の新たな手法として意義が大きいだけでなく、省エネルギー社会を実現する上で有用な技術の提案となっている。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the methodology was pursued for the energy conversion from continuous laser to high speed gas flow via micro/nano scale solid materials. After surveying several materials, we focused on using a low density porous material of carbon fiber, whose typical scale is micro scale. In the experiment, the energy conversion efficiency was found 20% at the maximum, and the maximum gas temperature was as high as 1500K. However, theoretical estimation suggests that the energy conversion can be increased up to 80%.

研究分野：航空宇宙工学・流体工学

キーワード：熱流体 輻射エネルギー輸送 宇宙推進 レーザー推進

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

連続レーザーを用いて気体を加熱するには、従来の方法としては、レーザーでバルク固体を加熱し、その表面の対流熱伝達で気体を加熱する方法、もしくは、プラズマを生成して加熱する方法が知られている。前者の方法では、熱伝達率が低く、流体の圧力損失が大きな問題となり、プラズマを生成する方法では、プラズマの不安定性が問題である。また、いずれの方法においても、固体表面、もしくはプラズマ表面からの放射放出に伴うエネルギー損失が大きな問題であった。

2. 研究の目的

本研究では、近赤外連続波レーザーを用いて、高速流の高温加熱を実現するために、レーザー光を従来のようにプラズマに吸収させるのではなく、マイクロ・ナノスケールの構造を有する固体に吸収させ、これを介して気体の加熱を行う方法の探索が、高速流体力学への学術的な貢献が期待できると同時に、航空宇宙分野での様々な応用が期待される。

本研究では、主に、カーボンファイバー多孔質を介した CW レーザーによるガスへの熱伝達におけるエネルギー変換過程に着目する。ただし、実験室で用いることのできる CW レーザーではパワー密度が低いため、パルスレーザーを用いた実験を並行して行い、より大出力のレーザーを用いた場合の知見を得る。レーザーのパワー密度が上がるにつれ、固体部のアブレーションが重要な問題となるため、パルスレーザーを用いたレーザーアブレーションの特性を調べる。実験では、CW、パルス、いずれの実験においても波長約 1 μm のレーザーを用いる。

以下では [1] CW レーザーを用いた研究に関する方法・成果 [2] パルスレーザーを用いた研究に関する方法・成果、について分けて記述する。

[1] CW レーザーを用いた研究に関する方法・成果

3. 研究の方法

測定対象となる熱交換器は大阪ガスケミカル社製のポラスカーボンを用いる (図 1)。表 1 で示すようにポラスカーボンは高い昇華点を持っているが、酸化環境下では 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上で徐々に酸化燃焼が始まってしまう。そこで、本実験では次節で述べる真空チャンバを作製し、その中にポラスカーボンを配置することにより、ポラスカーボンが焼失することを防ぐ。

ポラスカーボンは柔軟に形状を変化させることができるため、空隙率を変化させて、吸収係数などのパラメータの変化を評価する。

表 1 ポラスカーボン諸元

昇華点	3915 K
炭素繊維の太さ	13 μm

ポラスカーボンを配置するテストセクションを真空にすることは、前述のポラスカーボンの酸化燃焼を防ぐことの他に、熱伝導・熱伝達等の放射伝熱以外の形態の伝熱現象の影響を最小限にし、放射が支配的な場をつくりだすことにも意味がある。

真空チャンバの概念図を図 2 に示す。真空チャンバは SUS 製のフランジ、合成石英製の光学窓、石英製の試験管からなる。フランジには排気口を設け、PFA チューブを通じて真空ポンプ、圧力センサに接続する。真空ポンプはアルパック機工製の DAP-6D を用いて、真空チャンバ内が 1.0×10^{-4} Pa 以下になっていることを確認する。

この試験管内にポラスカーボンを配置することにより、レーザーによる加熱、および放射発光の様子を観察することができる。また、下記のカメラの較正試験でも使用した。

2 色法では 2 波長の光を選択的に取り出す必要がある。そこで、2 波長を透過するフィルタを介してカメラによる撮影を行った。試験体は石英試験管内に配置されるため、石英の透過率が高い可視光領域の光で計測を行うこととした。加熱用のレーザーとして、名古屋大学が所有する 3 kW の CW 半導体レーザーを使用する。表 2 にその諸元を示す。

表 2 加熱用レーザーの諸元

メーカー	Laser Line 社
製品名	LDF 3000-100 VGP
定格出力	3000 W
波長	930 \pm 10 nm
発振モード	CW (連続発振)



図1 ポーラスカーボン

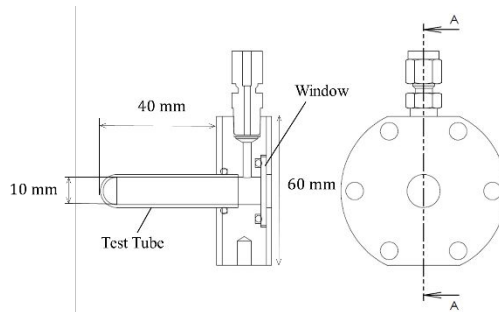


図2 真空チャンバ

4. 研究成果

ここではポーラスカーボンの空隙を $\alpha_p = 99.95$, レーザーのパワー密度を $3.72 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ とした場合の実験結果について示す. 図3 は定常状態におけるポーラスカーボンの発光の様子である. 繊維に至るまで輻射発光の様子を捉えることができている.

また, レーザー照射面(左側)が最も強く発光しており, 右方に向けて発光強度の勾配ができていることが確認できた. ただし, 半透明の輻射流体とは異なり, ポーラスカーボンが異方性・不均一性の材料であることは注意が必要である. 画像でも繊維が密な部分では後ろの方であったとしても強く発光している部分がある.

図4に2色法により求められた準1次元的な温度分布を示す. ポーラスカーボンが高温部では2000 K 以上に加熱されていることが分かり, 発光強度同様に温度分布も右方から左方に向けて勾配を持っていることが確認できた.

これらの実験に加え, 熱伝達現象を推定するためのガス流中におけるエネルギー収支計測実験も行っている. これらの実験データを理論モデルと比較することにより, 多孔質内における輻射損失・マイクロスケールの対流熱伝達を定性的に説明する理論の枠組みを構築できた. 2019年度(研究課題後)には, 多孔質内部における輻射・高速流動の3次元数値シミュレーションにより, エネルギー変換過程をより詳細に予測できる体制を構築しており, 本方法を用いたロケットエンジンの設計まで行う予定である.



図3 ポーラスカーボンの輻射発光の様子

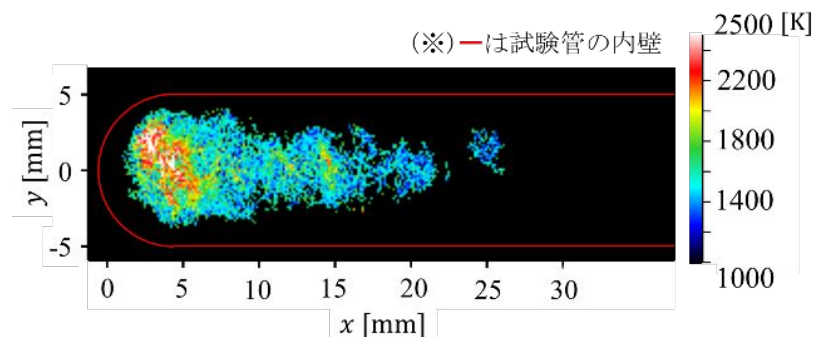


図8 2色法による温度分布計測結果

[2] パルスレーザーを用いた研究に関する方法・成果(詳細については, T.D. Tran, A. Yogo, H. Nishimura, and **K.Mori**, "Impulse and mass removal rate of aluminum target by nanosecond laser

ablation in a wide range of ambient pressure,” Journal of Applied Physics, Vol. 122, No.233304, 2017.)

3. 研究方法

The experiments are conducted in a vacuum chamber whose pressure is controlled by a rotary pump and a turbo-molecular pump. p_a is varied from 10 Pa to 100kPa. A Nd:YAG pulse laser is used. Pulse energy, EL, is 0.7 J, pulse width duration is 5 ns, and wavelength, is 1064 nm. The shot-to-shot variation of EL was controlled below 5%. The laser beam is focused on the target using a convex lens with a focal length of 200mm. The fluence is varied by changing the relative distance between the focus lens and the target. For ablation, the fluence should exceed a threshold value, typically of the order of several J/cm² for ns laser pulse. Three different spot diameters are used: 1.3, 2.1, and 4.1 mm, while the laser fluence changed as 52, 19, 5 J/cm², which exceed the ablation threshold. For Schlieren visualization, a high-speed camera HPV- X2 (Shimadzu Co., Ltd.) and a synchronized pulsed laser light source (Cavilux, Ltd., CAVILUX smart, wavelength: 640nm, pulse duration: 10–100ns) are used. The pulsed laser light source can supply invariable intensity of light during the experiment with the high brightness. The camera is filtered at the pulsed laser light source wavelength to eliminate the high intensity of plasma and light rays from Nd:YAG pulse laser due to the reflection on the target surface. In this study, the Schlieren images of plume and shock expansion are recorded at 5 106 frames per second in grey scale. The camera exposure time is 100 ns. For impulse measurement, the spherical target, as shown in Fig. 1, is mounted on a load cell (Kyowa Electronic Instruments, Japan). The target’s radius is 5 mm. The use of spherical target eliminates the diffraction of the shock wave at the periphery of the target. Moreover, the spherical shape is a prominent shape in order to improve the stabilization of the capsule launched by the laser beam. 19 Mass removal experiment is conducted by using the disk target.

4. 研究成果

An experimental study was carried out to investigate the impulse and the mass removal rate produced by a nanosecond 1.064 μm wavelength laser. The aluminum spherical target for the impulse measurement and the disk target for mass removal measurement were examined in a wide range of ambient pressures from 10 Pa to 100 kPa. For the ablation in an atmosphere of pressure at 100 Pa, Schlieren images of the plume interface were presented for the first time, the plume expanded anisotropically and quickly, compared to that in the atmospheric pressure higher than 10 kPa. Therefore, the impulse generation is dominated by the expansion of the blast wave at high atmospheric pressure. In contrast to using a CO₂ laser, the blast wave energy conversion efficiency is found insensitive to the ambient pressure. At the transient p_a , $100\text{Pa} < p_a < 10\text{kPa}$, the momentum coupling, C_m , is found to be the sum of the recoil moment of the ablation jet and the air pressure behind the blast wave. The maximum amount of mass removal rate, $e/41.25\text{g/J}$, is found at 20kPa and decreases quickly at the higher p_a due to the plasma shielding effect. From the values of e , the contribution of the ablation jet in the impulse generation is appreciable until p_a is of the order of 10 kPa.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

1. C. Xie, D.T. Tran, and **K. Mori**, “Numerical Study of Impulse Evaluation for Annular-Spot Laser Pulse on a Sphere,” Journal of Spacecraft and Rockets, 2019.
2. T.D. Tran, A. Yogo, H. Nishimura, and **K.Mori**, “Impulse and mass removal rate of aluminum target by nanosecond laser ablation in a wide range of ambient pressure,” Journal of Applied Physics, Vol. 122, No.233304, 2017.
3. **K. Mori**, "Laser-propelled launch of a spherical capsule guided by a donut-mode beam," Journal of Spacecraft and Rockets Vol. 54, No. 5, 2017, pp. 1183-1184. (IF: 0.93)
4. 亀井知己, 小野貴裕, 松井信, **森浩一**, 「100kW ファイバーレーザーを用いたレーザー打上システムの実現可能性の検証と将来の大量輸送システム」宇宙太陽発電, Vol.3 (2018) pp.38-45.
5. 江口敬祐, トラン ドウク トゥアン, 山森浩人, **森浩一**, 「ポーラスカーボン熱交換器を用いたCWレーザー推進」航空宇宙技術 Vol. 17, pp. 285-288, 2018.
6. T.D.Thuan, **森浩一**, 「2方向成分の力積を単一のロードセルで計測する方法」プラズマ応用科学, Vol.24-1 (2017).

[学会発表](計 9 件)(国際学会のみ)

1. D. T. Tran, K. Eguchi, C. Xie, **K. Mori**, “Impulse Generation of Donut-Spherical Laser Launch System in a wide range of ambient pressure,” AIAA Aviation 2018: Plasmadynamics and Lasers conference, Atlanta, USA (2018).
2. K. Eguchi, D. T. Tran, H. Yamamori, **K. Mori**, “Fundamental Experiment of CW Laser Propulsion with Porous Carbon Heat Exchanger,” AIAA SciTech 2018, Florida, USA (2018).
3. D. T. Tran, Chongfa Xie, **K. Mori**, “Experimental Investigations of Impulse Generation and Stabilization Performace on Spherical Target Irradiated by Donut-mode beam,” AIAA Aviation 2017, Plasmadynamics and Lasers Conference, Denver, USA (2017).
4. D. T. Tran, C. Xie, **K. Mori**, “Curved shock wave propagation in environmental stratosphere by

- laser ablation,” 31st International Symposium on Shock Wave, Nagoya, Japan (2017).
5. Chongfa Xie, Duc Thuan Tran, **Koichi Mori**, “Numerical Estimation of Laser-Ablation Propulsion Performance in Spherical Capsule,” 31st International Symposium on Shock Waves, Nagoya, Japan, No.SBM000190 (2017).
 6. Chongfa Xie, Duc Thuan Tran, **Koichi Mori**, “Numerical Estimation of Laser-Ablation Propulsion Performance in Spherical Capsule.” The 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Matsuyama, Japan, No.2017-e-09 (2017).
 7. Duc Thuan Tran, Chongfa Xie, **Koichi Mori**, “Impulse performance of Donut-Spherical Laser Launch System in Stratosphere Air-Pressure Conditions.” The 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Matsuyama, Japan, No. 2017-b-67p (2017)
 8. **K. Mori**, “Laser Powered Air-Breathing Blast Wave Propulsion Guided By Donut-Mode Beam” AIAA Propulsion and Energy 2016, Salt Lake City, USA (2016).
 9. **K. Mori**, R. Maruyama, and K. Shimamura, “Launch capability of a conceptual laser-launch system of a spherical vehicle and a donut-mode beam” 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech 2016, San Diego, USA, AIAA 2016-0457, (2016)

〔図書〕(計 1 件)

“Beamed Launch Propulsion,” in “Propulsion Systems” ed. Alessandro Serpi, ISBN 978-953-51-6674-0, IntechOpen ltd., London (2019)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：松井誠

ローマ字氏名：Makoto Matsui

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。