

# STEP-2013-071 レーザ駆動飛翔体の力積ベクトル測定

○小山拓実, 戸嶋優希, 武藤勇気, 堀澤秀之 (東海大学)

Impulse vector characteristics of a laser-driven vehicle

Takumi Oyama, Toshima Yuki, Muto Yuki and Hideyuki Horisawa (Tokai University)

Key Words: Laser ablation, Shock wave, Thrust vector, Impulse-bit

## Abstract

In this study, direct focusing of repetitive high-power laser pulses on an arbitrary surface of the vehicle in atmosphere were proposed, in which a blast wave was generated at each pulse and pushes the vehicle on the surface inducing an impulse or thrust vector. A fundamental investigation was conducted on interaction of a focused high-power laser pulse, or blast wave, and the surface with arbitrary shape. As the first step of the experiment, for simplicity, some fundamental shapes of the surface, or a vehicle, were assumed, which were planar and semicircular bodies, and shock-surface interactions were investigated. As results, a deeper convex vehicle showed largest vertical impulses, and a shallower convex vehicle showed smallest horizontal impulses.

## 1. まえがき

遠隔基地に配備した高出力レーザを照射することで飛翔体を推進させるレーザ推進の概念は1972年にKantrowitzにより提唱された<sup>1, 2)</sup>。大気中で高強度レーザを固体表面に照射する場合の相互作用においては、特に表面近傍に存在する大気が強く影響を及ぼす。すなわち、表面上の空気が高強度レーザにより絶縁破壊し、レーザ支持デトネーションが発生する<sup>3, 4)</sup>。放物面状のノズルを用いる場合、集光鏡の役割も担うため、集光点付近で絶縁破壊が生じる<sup>5)</sup>。

Ageevらは、円錐型ノズルと放物型ノズルについて推力発生に及ぼすノズルの幾何学的な影響について調査した<sup>6)</sup>。その結果、一定のレーザパルスエネルギーに対して最適なノズル長が存在することを確認した。Myraboらは、任意のノズル形状における最適なレーザパルスエネルギーを与える条件を見出した<sup>7)</sup>。さらに、森らはノズル内のブラスト波発生から推力発生に至る空気力学的な過程について調査し、ノズル形状のスケール則を導出した<sup>8)</sup>。

レーザ推進による飛翔体の飛行実験については、Myraboらによる初の飛行実験の成功を受けて、各国においても同様の垂直飛行やワイヤー支持飛行など多くの実証実験が行われた<sup>9)</sup>。

本研究においては、従来の直線的な飛行実験とは異なり、飛翔体の3次元的な飛行の実現を目指す。すなわち、大気中で飛翔体の任意の表面にパルスレーザを繰り返し集光・照射し、任意表面でブラスト波を連続的に発生させることで推力(ベクトル)を発生させ、そのベクトルの方向に飛翔体を連続的に加速させることを狙う。

本研究では基礎研究として、高出力パルスレーザ(ブラスト波)と任意形状の飛翔体表面の相互作用により発生する推力ベクトルの特性評価を行った。まずは、最初の試みとして、大気中でレーザを固体表

面に照射した際の大気との相互作用を熱量計測から測定し、また、平板や半円などの単純2次元形状の飛翔体を仮定して実験的に曲面にレーザを照射し、2軸振り子式スラストスタンドを用いて力積を測定した。

## 2. 実験装置および方法

Fig.1に実験装置の概略図を示す。レーザ発振器にはTEA (Transverse Excited Atmospheric) CO<sub>2</sub>レーザ(LUMONICS, TE 822-HP, 最大パルスエネルギーE = 10 J, λ = 10.6 μm)を用いた。ターゲットにはPOM (polyoxymethylene, polyacetal)を用い<sup>9)</sup>、ZiSe製の平凸レンズ(f = 5 in = 127 mm)を用いてターゲット表面(あるいは近傍の任意の位置)に集光した。

ターゲット形状については、平板や半円筒形状(Fig. 2)を使用した。本研究においては、1)ターゲットから発生するプルームの観察、2)力積ベクトルの計測、3)プルームから発生する熱量の計測、のそれぞれを行い、各条件について比較・検討した。

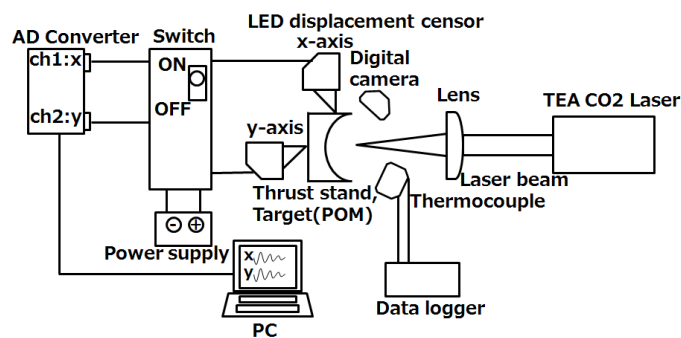


Fig.1 実験装置概略図

### 2-1 力積ベクトル特性評価

本研究において、基本的な形状として、2次元の飛翔体モデルを平板と曲面形状と仮定した。Fig. 2 に曲面形状ターゲットのノズル頂角と半径の概略図を示す。Fig. 3 に曲面形状モデルにおけるレーザ照射位置  $\theta = 90 \text{ deg}$ ,  $\theta = 60 \text{ deg}$ ,  $\theta = 30 \text{ deg}$  の概略図を示す。

力積ベクトル測定実験の装置図を Fig. 1 に示す。曲面形状ターゲットに TEA CO<sub>2</sub> レーザ ( $E = 2 \text{ J}$ ) を照射し、2軸振り子式スラストスタンドの変位を  $x$  方向および  $y$  方向に設置した LED 変位センサ (OMRON, Z4W-V25R) で計測した。この計測をレーザ照射位置  $\theta = 90 \text{ deg}$  から  $\theta = 15 \text{ deg}$  まで  $15 \text{ deg}$  刻みで行った。スラストスタンドは Fig. 4 に示すように、それぞれ独立した2段のナイフエッジ部を支点とする2軸振り子式で、 $x$  方向および  $y$  方向の2軸の同時計測が可能で、変位の分解能は  $10 \mu\text{m}$  である。キャリブレーションは糸で吊るした錘を完全非弾性衝突させることで行った。

曲面形状ターゲットの材料には CO<sub>2</sub> レーザとの相性の良い POM を用いた。レーザ照射位置の移動方法を Fig. 5 に示す。レーザビームの軸を固定し、スラストスタンドをステージ上で  $x$  軸方向に移動させることでレーザ照射位置を決定した。

### 2-2 デフォーカス実験

ターゲットと集光レンズの距離を  $90\text{mm}$  から  $150\text{mm}$  まで  $10\text{mm}$  刻みで離していき、レーザ照射をした。このときの変位を LED 変位センサで計測した。集光レンズは焦点距離  $f = 127\text{mm}$  のジンクセレン平凸レンズを使用した。また、レーザ照射角も同様に  $\theta = 90 \text{ deg}$ ,  $\theta = 60 \text{ deg}$ ,  $\theta = 30 \text{ deg}$  と変化させていった。

### 2-3 アブレーションプルームの観察と熱量計測

ターゲットへのレーザ照射に伴い発生するアブレーションプルームの挙動を観察するために高速度カメラ (最大フレームレート  $40,500 \text{ fps}$ ) およびデジタルカメラ (同  $1000 \text{ fps}$ ) を用いて撮影を行った。また、同時に分光計測も行った。

ターゲットにレーザを照射した場合のアブレーションプルームと大気との化学反応で発生する熱量を見積もるために、プルームの熱量を熱量計を用いて測定した。実験装置図を Fig. 1 に示す。熱量計は内側 (受熱部) がアルミニウム製 (質量  $1.86\text{g}$ ) で外側に断熱材を被せて断熱している。プルームからの熱量を受熱部が受けて熱平衡状態に達することを確認するために、受熱部上の2点の温度の時間変化を銅-コンスタンタン熱電対 (素線径  $0.7\text{mm}$ ) で計測した。この温度と受熱部の熱容量から入熱量を見積もった。

計測においては、大気の影響を考慮する場合と排除する場合の二通りについて検討した。排除する場合は、Fig. 6 に示すように、ターゲットおよび熱量計をビニールシートで覆い、シート内を窒素ガスで充填した。

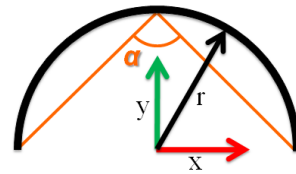
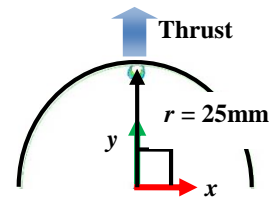
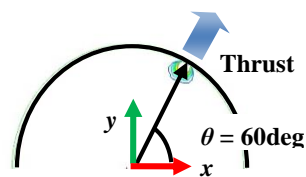


Fig. 2 ノズル頂角と半径の概略図



(a)  $\theta = 90 \text{ deg}$



(b)  $\theta = 60 \text{ deg}$

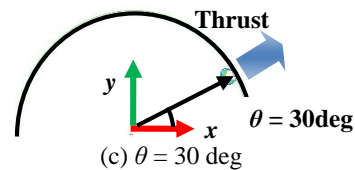


Fig. 3 曲面形状ターゲットにおけるレーザ照射角の概略図

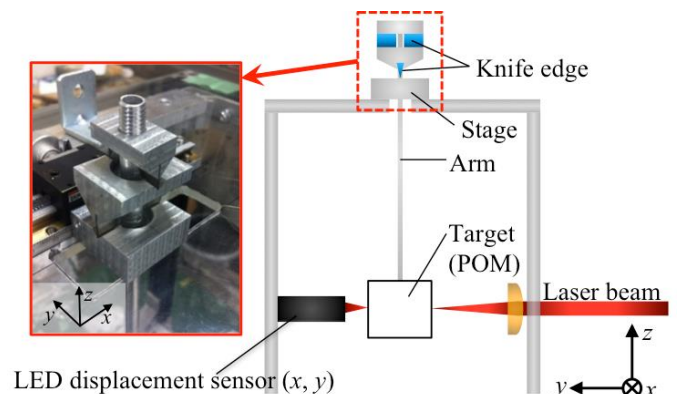


Fig. 4 スラストスタンドの概略図

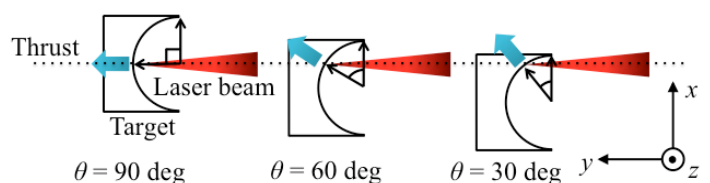


Fig. 5 レーザ照射位置の移動方法

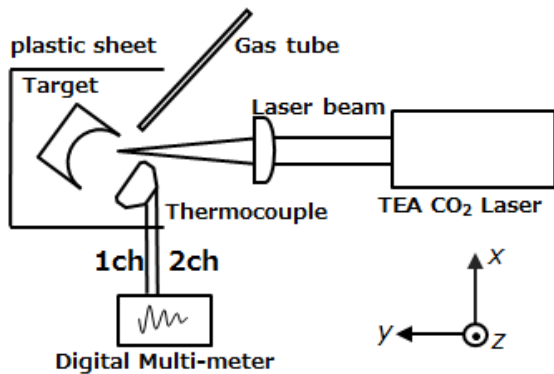


Fig. 6 窒素ガス充填装置図

### 3 実験結果および考察

#### 3-1 アブレーションプラズマの挙動

大気中でターゲットに対してレーザー照射角 $\theta = 90$  degと $\theta = 30$  degで照射した際に発生したアブレーションプラズマの様子をFig. 7に示す。アブレーションプラズマは概ね赤色で、照射面と垂直な方向に対流・拡散しながら約6 cm程度まで到達していることが分かる。アブレーションプラズマの分光結果をFig. 8に示す。H $\alpha$  (656 nm), O (777 nm) が特に顕著で、さらにはターゲット由来のC (500~600nm) およびCN (CN violet, 350~450 nm付近) のスペクトルが見られる。特に、CNはターゲットの炭素と大気中の窒素が反応した生成物であり、従って、この場合、アブレーションプラズマと大気が化学反応しているといえる。

一般的に真空中においてターゲットへのレーザー照射に伴い発生するアブレーションプラズマは、数十マイクロ秒オーダーの短時間のみ観察される。一方大気中においては、大気との流体力学的干渉および化学反応などにより、数十ミリ秒オーダーの比較的長時間観測されることが認められた。

#### 3-2 力積ベクトル特性評価実験

曲面形状ターゲットへのレーザー照射実験により得られたレーザー照射位置と力積ベクトルの関係をFig. 9に示す。この結果より、レーザー照射位置が中心部 ( $\theta = 90$  deg) では力積ベクトルy成分が最大値を示し、端部に近づくにつれ、力積ベクトルx成分が増加すると共に、y成分は減少していることがわかる。また、最端部 ( $\theta = 15$  deg) において力積ベクトルx成分が最大値を示すことが確認された。

#### 3-3 デフォーカス実験

レンズ-ターゲット間距離を変化させながら曲面形状ターゲットへレーザーを照射したときの力積ベクトルとレンズ-ターゲット間距離の関係をFig. 10に示す。

力積ベクトルは、レンズ焦点距離付近である130mm

の位置にレンズを設置したときに最大値を示した。レーザー集光点をターゲット表面から焦点距離の10%程度離す、または近づけると力積が40%程度減衰することがわかる。

#### 3-4 アブレーションプラズマの熱量計測

大気中および窒素雰囲気中においてターゲット表面にレーザーを連続的に照射したときの熱量計受熱部の温度 $\Delta T$ の時間履歴をFig. 11, 12にそれぞれ示す。Ch1, 2はそれぞれ受熱部の2点の温度を示しており、それぞれの温度がほぼ同一であることから、この場合に熱量計が熱平衡状態に達しているといえる。

Fig. 11において、ターゲットを大気中に置いたときのレーザー照射した総熱量は100秒間において約1040 Jであった。この時、熱量計で計測した入熱量は約3 Jで、入射レーザーエネルギーとの割合は約0.31%である。一方で、Fig. 12において、ターゲットを窒素雰囲気中に置いた場合、レーザー照射した総熱量は100秒間において約960 Jであるが、この時、熱量計で計測したエネルギーは約1.5 Jで、入射レーザーエネルギーとの割合は約0.16%である。これらの結果から、ターゲットを大気中においてレーザーアブレーションさせた場合、アブレーションプラズマと大気との化学反応により、発熱反応が起きていることが確認された。

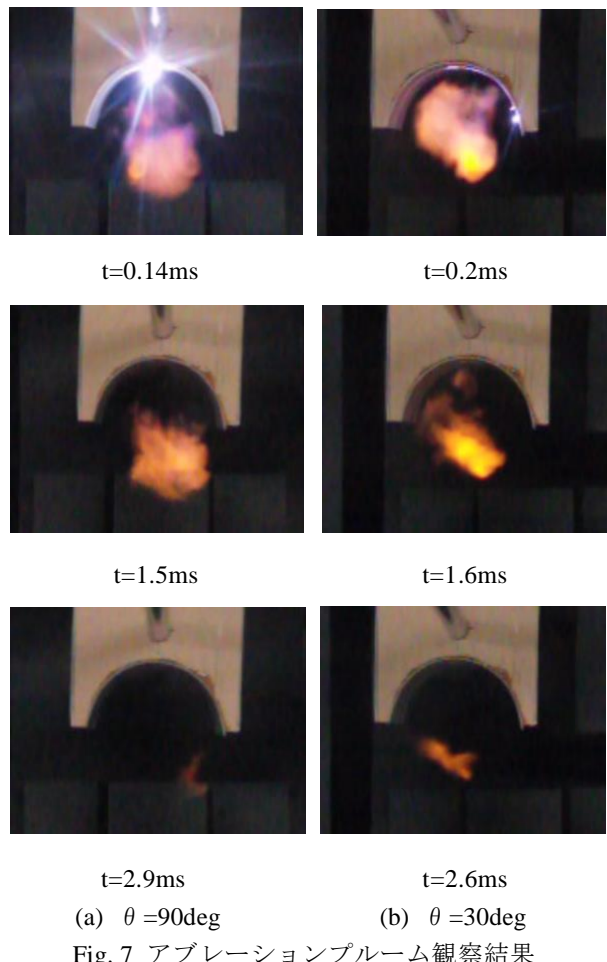


Fig. 7 アブレーションプラズマ観察結果

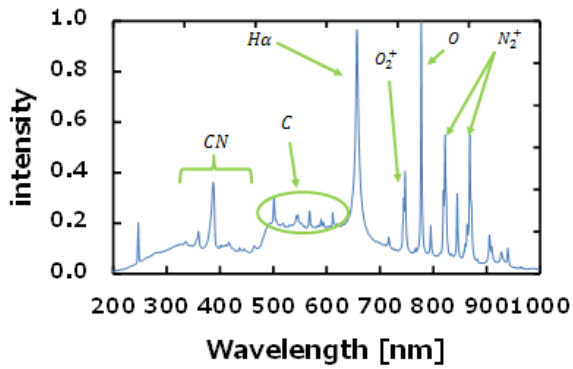


Fig. 8 アブレーションプラズマ分光結果

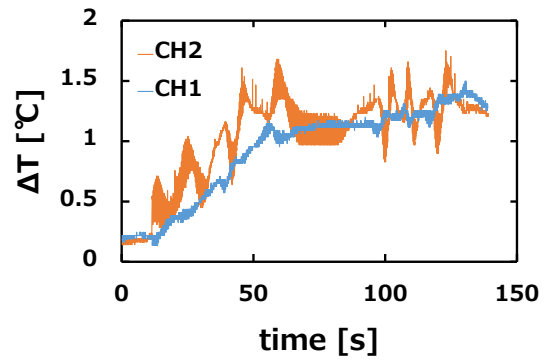


Fig. 12 窒素中におけるアブレーション  
プラズマの時間履歴

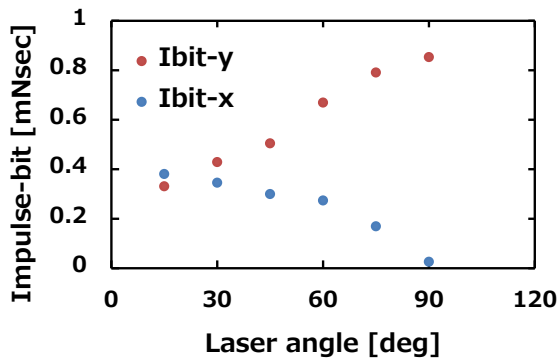


Fig. 9 レーザ照射位置と力積ベクトルの関係

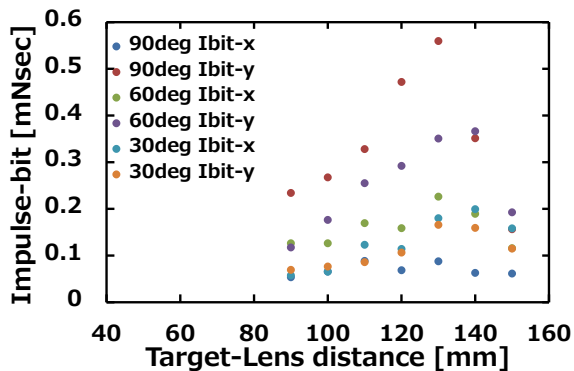


Fig. 10 力積ベクトルとレンズ-ターゲット間距離  
の関係

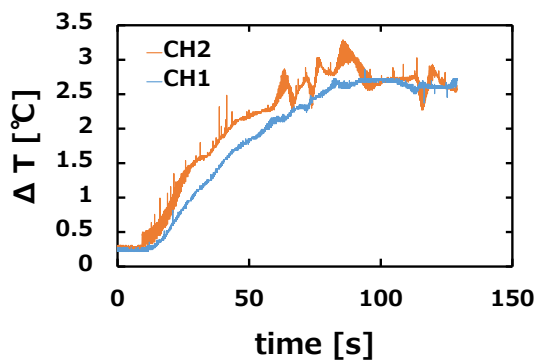


Fig. 11 大気中におけるアブレーション  
プラズマの時間履歴

#### 4 結論

単純 2 次元形状の飛翔体を仮定して、高出力パルスレーザー (プラスト波) と飛翔体表面近傍に存在する大気との相互作用による化学反応と発生する推力ベクトルの特性評価を曲面形状ターゲットへのレーザー照射実験により行った。これより、推力ベクトル発生特性を得ることが出来た。それら結果は以下の通りである。

- 1) ターゲット表面近傍に存在している大気、主に  $H\alpha$  と  $O$  がレーザーアブレーションプラズマと熱化学反応を起こしている。
- 2)  $\theta = 90 \text{ deg}$  のとき、力積ベクトル  $y$  成分が最大となり、 $x$  成分が最小となり、 $\theta = 15 \text{ deg}$  のとき、力積ベクトル  $x$  成分が最大となり、 $y$  成分が最小となる。

#### 参考文献

- 1) Kantowitz, A. R., "The Relevance of Space," *Aeronautics and Astronautics*, Vol. 9, No. 3, pp. 35, 1971
- 2) Kantowitz, A. R., "Propulsion to Orbit by Ground Based Lasers," *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 9, No. 3, pp. 40-42, 1972.
- 3) Pirri, A. N., and Weiss, R. F., "Laser Propulsion," AIAA Paper 72-719, 1972.
- 4) Pirri, A. N., Schlier, R., and Northam, D., "Momentum Transfer and Plasma Formation Above a Surface with a High-Power  $CO_2$  Laser," *Applied Physics Letters*, Vol. 21, No. 3, pp. 79-81, 1972.
- 5) Prri, A. N., Monsler, M. J., and Nebolsine, P. E., "Propulsion by Absorption of Laser Radiation," *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 9, pp. 1254-1261, 1974.
- 6) Theoretical Modeling of Laser Propulsion, *Acta Astronautica*, Vol. 7, No. 1, pp. 79-90, 1980.
- 7) Myrabo, L. N., Libeau, M. A., Meloney, E. D., Bracken, R. L., and Knowles, T. B., "Pulsed Laser

Propulsion Performance of 11-cm Parabolic ‘Bell’ Engines Within the Atmosphere, ” AIAA Paper 2002-3783, May 2002.

- 8) Mori, K., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., “Nozzle Scale Optimum for the Impulse Generation in a Laser Pulsejet” *Journal of Spacecraft and Rocket*, Vol. 41, No. 5, pp. 887-889, 2004.
- 9) Phipps, C., Birkan, M. , Bohn, W. , Eckel, H. A. , Horisawa, H. , Lippert, T. , Michaelis, M. , Rezunkov, Y. , Sasoh, A. , Schall, W. , Scharring, S. , and Sinko, J., “Review: Laser-Ablation Propulsion, ” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 4, pp. 609-637, 2010.