

# レーザー駆動飛翔体の推力ベクトルの発生特性

○萩原啓司, 西川陽介, 小山拓実, 堀澤秀之, 福田紘大 (東海大学)

## Thrust vector characteristics of a laser-driven vehicle

Keiji Hagiwara, Yosuke Nishikawa, Takumi Oyama, Hideyuki Horisawa and Kota Fukuda (Tokai University)

Key Words: Laser ablation, Shock wave, CFD, 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. Numerical simulation on characteristics of impulse, or thrust, vector generation on the surface was conducted. As the first step of the simulation, for simplicity, some fundamental shapes of the surface, or a vehicle, were assumed, which were planar and semicircularbodies, 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. 諸言

遠隔基地に配備した高出力レーザーを照射することで飛翔体を推進させるレーザー推進の概念は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ー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ーにより絶縁破壊し、レーザー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、一定のレーザー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ー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、森らはノズル内のプ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>。

レーザー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、任意表面でプ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。

本報では基礎研究として、高出力パルスレーザー(プラスト波)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数値計算により行った。まずは、最初の試みとして、平板や半円などの単純2次元形状の飛翔体を仮定して評価を行った。また、実験的に曲面にレーザーを照射し、2軸振り子式スラストスタンドを用いて力積を測定し、数値計算との比較を行った。

## 2. 数値計算法

本解析には、汎用流体シミュレーションコード(CFD++, Metacomp社)を用いた。このコードでは、圧縮性Navier-Stokes方程式をTVDスキームを用いて解いており、空間精度はMUSCL法により2次精度で内挿している。また、時間積分にはEuler陰解法を用いている。流束の見積もりにおいてはHLLC法を用いている。

本研究では、大気中において高出力パルスレーザーを飛翔体表面に照射し、その際に発生するプラスト波の伝播とそれに伴い発生する推力ベクトルの時間変化について観察した。また、それらの時間積分値である力積ベクトルについて、各種条件における発生特性を調査した。

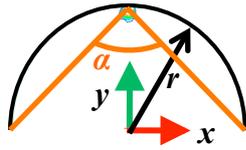


図 1 解析モデルの概略図

表 1 モデルパラメータ

Model number	1, 1'	2, 2'	P (Plate)
Nozzle cone angle, $\alpha$ : deg	90	135	180
Radius, $r$ : mm	25	25	25 (half width)

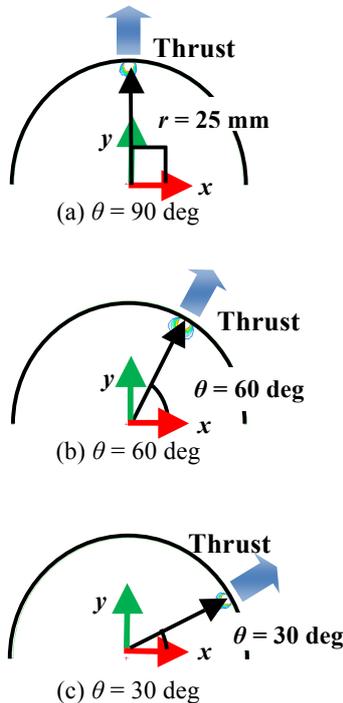
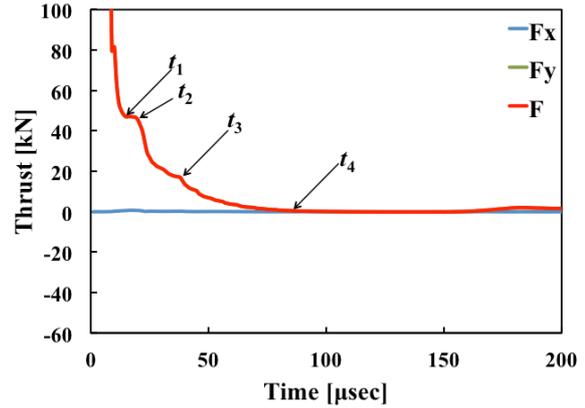


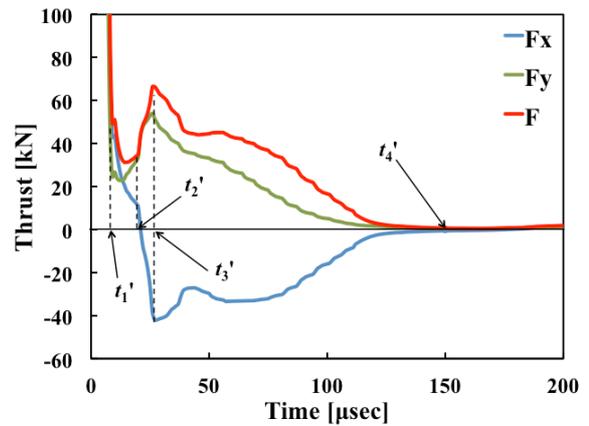
図 2 レーザ照射位置と推力ベクトル概略図

本計算においては、基本的な形状として、2次元の飛翔体モデルを3種類仮定した。図1にノズル頂角と半径の概略図、表1にモデルの代表的なパラメータを示す。また、Model-1とModel-2は凸形状であるが、凹形状としてModel-1'およびModel-2'についても計算を行った。

図2にModel-1におけるレーザ照射位置  $\theta = 90$  deg,  $\theta = 60$  deg,  $\theta = 30$  degの概略図を示す。また、Model-2においては  $\theta = 90$  deg,  $\theta = 75$  deg,  $\theta = 60$  degとし、Model-Pでは  $\theta = 90$  deg,  $\theta = 76$  deg,  $\theta = 66$  degと設定した。この場合の推力ベクトルは2次元的に発生するので、図に示すように推力(力積)ベクトルの水平方向をx軸、鉛直方向をy軸とした。これらのモデルにおける推力(力積)ベクトルから、レ



(a)  $\theta = 90$  deg



(b)  $\theta = 60$  deg,  $\theta = 30$  deg

図 3 推力の典型的な時間変化

ーザ誘起衝撃波の伝播による飛翔体の加速度ベクトルについて考察できる。なお、初期のブラスト波には、爆発ソースモデルを仮定し、半径1mmの円領域に圧力8,000 MPa、温度5,000 Kとした。

### 3. 数値計算結果および考察

#### 3.1 推力の時間履歴と圧力等高線

ブラスト波による瞬間的な推力は、飛翔体表面の各位置における局所的な圧力と面積要素ベクトルの積を各時間において算出し、それらを上面および下面で積分することで算出した。

ここで、代表的な推力の時間変化を図3(a)と(b)に示す。図中では、 $\theta = 90$  degにおいて、レーザ照射の瞬間を $t_0$ 、推力のy成分が最小に到達する時刻を $t_1$ 、推力のy成分が2回目のピーク値に到達する時刻を $t_2$ 、衝撃波面が飛翔体の端部に到達する時刻を $t_3$ 、さらに合成推力が0に収束する時刻を $t_4$ とした。一方、他のレーザ照射角度では $\theta = 90$  degとは異なる推力の時間変化を示し、レーザ照射の瞬間を $t_0'$ 、衝撃波

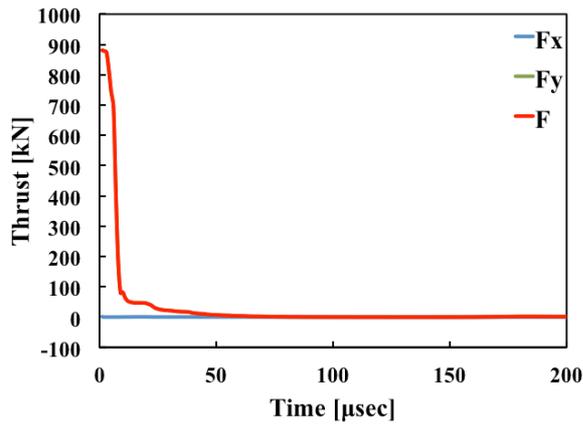


図 4 推力の時間履歴, Model-1,  $\theta=90$  deg

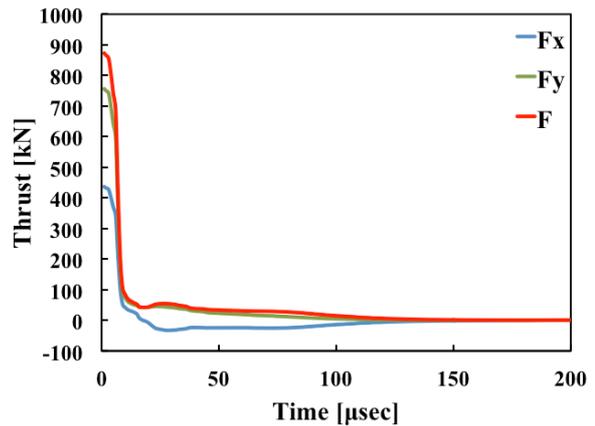
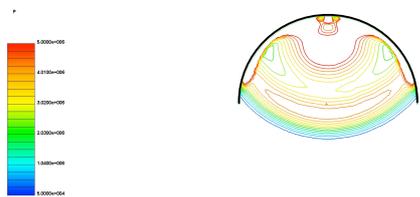
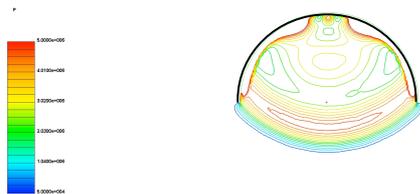


図 6 推力の時間履歴, Model-1,  $\theta=60$  deg

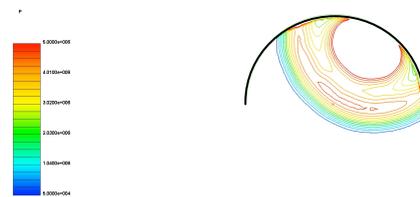


(a) 15  $\mu$ sec

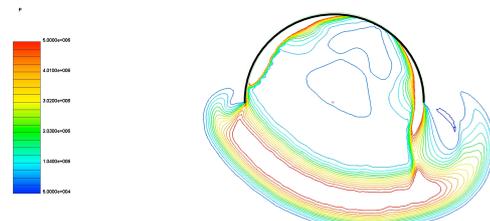


(b) 17  $\mu$ sec

図 5 圧力等高線, Model-1,  $\theta=90$  deg



(a) 13  $\mu$ sec



(b) 28  $\mu$ sec

図 7 圧力等高線, Model-1,  $\theta=60$  deg

面が飛翔体の端部に達する時刻を  $t_1'$ , 推力の  $x$  成分が 0 になる時刻を  $t_2'$ , 推力の  $x$  成分が最小値に到達し, 推力の  $y$  成分が 2 回目のピーク値になる時刻を  $t_3'$ , 全推力が 0 に収束する時刻を  $t_4'$  とした.

図 4, 5 は Model-1 を用いて  $\theta=90$  deg の場合における推力の時間履歴とそれに対応する圧力等高線を示している. 図 4 より,  $t=0$   $\mu$ s でブラスト波が発生し, 初期推力の  $y$  成分は約 880 kN となった. これに対し, 推力の  $x$  成分は常に約 0 であるが, ここで完全に 0 ではなく微小な変化をしているのは, 左右非対称な現象によるものと考えられる. しかしながら, 次節で示すが, これらを時間積分した力積ベクトル  $x$  成分は 0 である.

図 5 (a) は推力の  $y$  成分が急激に低下した瞬間の時刻における圧力分布を示し, (b) は衝撃波面が飛翔

体の端部に到達した時刻における圧力分布を示している.

図 6, 7 は Model-1 を用いて  $\theta=60$  deg の場合の結果を示している. 図 6 より, レーザ照射直後に  $x$  成分,  $y$  成分ともに正の推力が働いていることが確認できる. 初期推力の  $y$  成分は約 760 kN, 初期推力の  $x$  成分は約 440 kN であった. また, 図 7 (a) は衝撃波面がターゲットの端部に到達した時刻, (b) は  $x$  方向推力が最小値に達し, 推力の  $y$  成分が 2 回目のピーク値に達した時刻における圧力分布をそれぞれ示している.

図 8, 9 には Model-1 における  $\theta=30$  deg の場合の結果を示す. 初期推力は  $y$  成分と  $x$  成分それぞれ約 430 kN, 750 kN であった. 図 9 (a) は衝撃波面が飛翔体の端部に到達した時刻, (b) は推力の  $x$  成分が最小

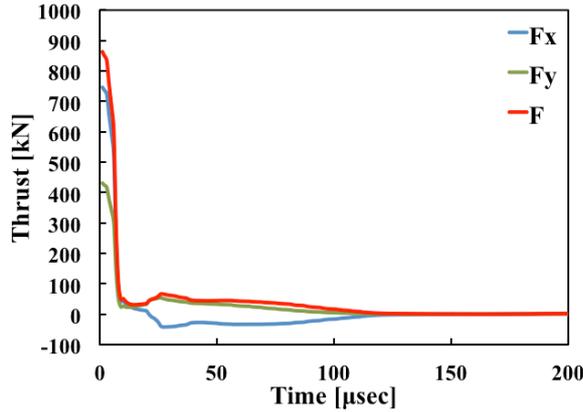
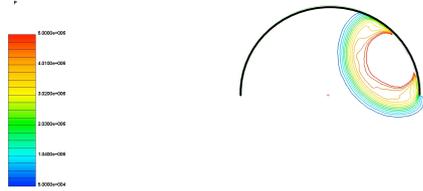
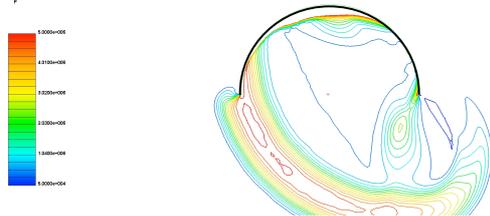


図 8 推力の時間履歴, Model-1,  $\theta = 30 \text{ deg}$



(a) 9  $\mu\text{sec}$



(b) 27  $\mu\text{sec}$

図 9 圧力等高線, Model-1,  $\theta = 30 \text{ deg}$

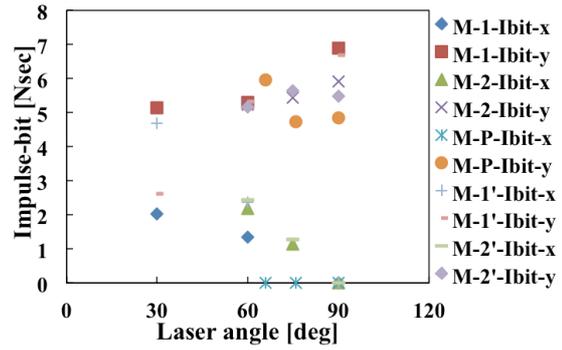
値となり推力の  $y$  成分が 2 回目のピーク値に達した時刻における圧力分布をそれぞれ示す. 図に示すように, 衝撃波が端部から上面に回り込むとき, 上面側の圧力上昇が生じる. この圧力によって負の推力が発生し, 推力の  $x$  成分は負の値となっている.

### 3.2 レーザ照射位置と力積ベクトルの関係

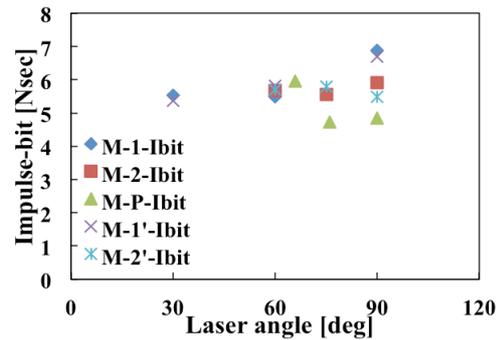
Model-1 から Model-P のそれぞれの場合における推力ベクトルを時間積分することで, 各場合における力積ベクトルを算出し比較した.

レーザー照射位置と力積ベクトルの関係を図 10 に示す. (a) は力積ベクトル  $x$  成分および  $y$  成分, (b) は全力積ベクトルを示している.

Model-1 と Model-2 において, 最大全力積ベクトルは  $\theta = 90 \text{ deg}$  で得られ, このとき, 力積ベクトル  $y$  成



(a) 力積ベクトル  $x$  成分および  $y$  成分



(b) 全力積ベクトル

図 10 力積ベクトルとレーザー照射位置の関係

分も最大値を示し, 力積ベクトル  $x$  成分は 0 となった. 一方, それぞれのモデルにおいて最小レーザー照射角度 (右端部付近) のとき, 全力積ベクトルは最小値となり, 力積ベクトル  $y$  成分も最小値を示し, 力積ベクトル  $x$  成分は最大値を示している. すなわち, 力積ベクトルはレーザー照射位置が  $\theta = 90 \text{ deg}$  のときは  $+y$  方向に発生し, レーザ照射位置が端部付近では  $+x$  方向に発生している. また, Model-2 において, すべてのレーザー照射角度に対する力積ベクトル  $y$  成分は,  $x$  成分よりも大きくなっている. これは, Model-2 は平面に近い形をしているので, 面積ベクトルの  $x$  成分は小さくなるため, それに応じて力積ベクトル  $x$  成分も小さくなる. Model-P においては, 平板形状で  $x$  成分面積ベクトルを持たないので, すべての条件で力積ベクトル  $x$  成分は 0 であった. また, 中心部にレーザーを照射した時より, 端部付近の方が力積ベクトルが大きな値を示している. これは, 下面において, 端部付近で発生する圧力波の方が中心で発生する圧力波よりも伝播時間すなわち下面に作用する時間が長いためであると考えられる.

すべてのモデルを比べてみると, Model-1 の  $\theta = 90 \text{ deg}$  のときに最大力積ベクトルが得られた. 森らによると<sup>8,10</sup>, 円錐型と放物型ノズルについて高出力パル

スレーザをノズル頂点に照射したとき、ノズル頂角の小さい方が高い性能を示すことが報告されている。本研究においてもこの傾向と同様に、Model-1は3種類の中で最も小さなノズル頂角を持ち、より高い推力性能を示した。

これらのことから、衝撃波によって誘起される力ベクトルの要素が局所圧力と面積要素ベクトルの積であること、初期の10  $\mu\text{sec}$ 程度までに発生する推力で全力積の90%に達していること、ならびに、この間に圧力が作用する面積要素がレーザ照射点付近に局限されていること、などの理由で、力積ベクトルの向きはレーザ照射点の面積要素ベクトルの向きでほぼ決定されるといえる。

#### 4. 実験装置および方法

本実験で使用した実験装置図を図11に示す。曲面形状ターゲットにTEA CO<sub>2</sub>レーザ(LUMONICS, TE 822-HP,  $E=2\text{ J}$ ,  $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$ )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)によって計測した。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 deg刻みで行った。スラストスタンドは図12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は、数値計算で仮定したModel-1と同様の半円モデルとし、材料にはCO<sub>2</sub>レーザとの相性の良いPOM<sup>9)</sup>を用いた。レーザ照射位置の移動方法を図12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。

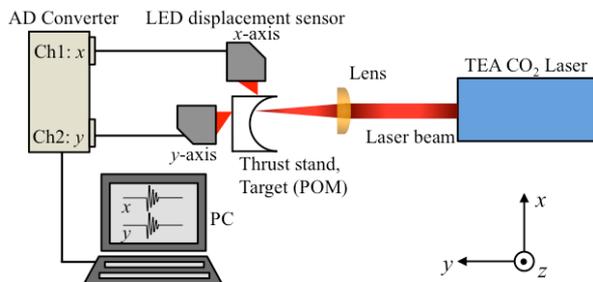


図 11 実験装置

#### 5. 実験結果および考察

曲面形状ターゲットへのレーザ照射実験により得られたレーザ照射位置と力積ベクトルの関係を図14に示す。この結果より、レーザ照射位置が中心部( $\theta=90\text{ deg}$ )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( $\theta=15\text{ deg}$ )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。力積ベクトルx成分の増加傾向がCFDの結果と比べて直線的でないのは、端部に近づくにつれ、衝撃波通過後に発生する負圧の影響および、端部からの衝撃波の巻き込みの影響が大きくなるからだと考えられる。実験結果より、数値計算による結果と同様の傾向を示していることが確認できた。

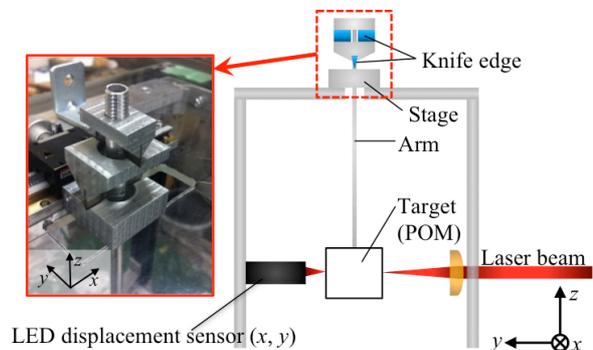


図 12 スラストスタンド概略図

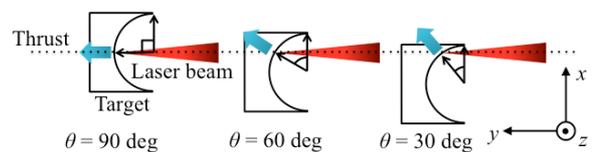


図 13 レーザ照射位置移動方法

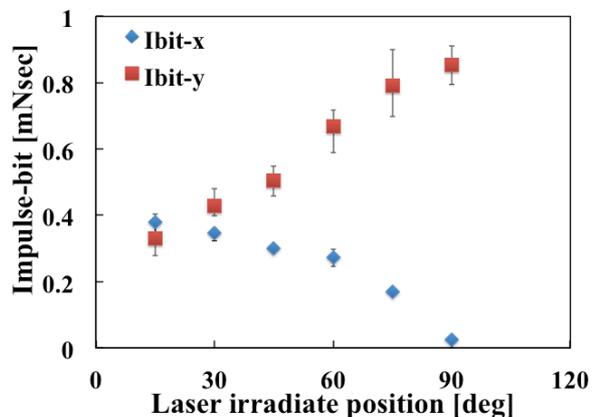


図 14 レーザ照射位置と力積ベクトルの関係

## 6. 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（ブラスト波）と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数値計算および曲面形状ターゲットへのレーザ照射実験により行った。これより、数値計算と実験の結果は同様の傾向を示し、力積ベクトルの向きは面積ベクトルの向きによって決まることが確認された。また、数値計算および実験において、仮定した飛翔体形状からそれぞれの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) 数値計算

1.1) Model-1 において、最大推力の  $y$  成分は  $\theta = 90$  deg のときに 880 kN となった。また、最大推力の  $x$  成分は  $\theta = 30$  deg のときに 750 kN が得られた。

1.2) Model-1 と Model-2 の両方において、最大力積ベクトルは  $\theta = 90$  deg のときに得られ、この時、力積ベクトル  $y$  成分も最大となるが、力積ベクトル  $x$  成分は 0 となった。Model-3 について、中心部よりエッジ付近に照射した時の方が、僅かではあるが大きな値を示した。3 つのモデルを比較すると、最大力積ベクトルは Model-1 の  $\theta = 90$  deg のときに得られた。

### 2) 実験

2.1)  $\theta = 90$  deg のとき、力積ベクトル  $y$  成分が最大となり、 $x$  成分が最小となる。

2.2)  $\theta = 15$  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) Kantrowitz, A. R., "The Relevance of Space," *Aeronautics and Astronautics*, Vol. 9, No. 3, pp. 35, 1971
- 2) Kantrowitz, 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<sub>2</sub> 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) Ageev, V. P., Barchukov, A. I., Bunkin, F. V., Konov, V. I., Korobeinikov, V. P., Putjatin, B. V., and Hudjakov, V. M., "Experimental and 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.
- 10) Katsurayama, H., Komurasaki, K., Hirooka, Y., Mori, K., and Arakawa, Y., "Numerical Analyses of Exhaust and Refill Processes of a Laser Pulse Jet," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 5, pp. 999-1006, 2008.