

# 小型レーザープラズマ静電加速型複合推進機の性能評価 Characterization of a Micro-Laser-Plasma Electrostatic-Acceleration Hybrid-Thruster

Akira Igari\*, Masatoshi Kawakami\*, Hideyuki Horisawa\*, and Itsuro Kimura#

Department of Aeronautics and Astronautics, Tokai University

\*Professor emeritus, University of Tokyo

1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

3amsm001@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

Keywords: Laser propulsion, Laser ablation, Laser/electric hybrid propulsion, electrostatic acceleration, Faraday cup, Time of flight measurement.

## Abstract

As one of the concepts of the laser/electric hybrid propulsion system, a feasibility study on possibilities of electrostatic acceleration of a laser ablation plasma induced from a solid target was conducted. Energy distributions of accelerated ions were measured by a Faraday cup. A time-of-flight measurement was also conducted for ion velocity measurement. It was found that an average speed of ions from a pure laser ablation in this case was about 20 km/sec for pulse energy of 40  $\mu$ J/pulse with pulse width of 250 psec. On the other hand, through an electrostatic field with a +1,000 V electrode, the speed could be accelerated up to 40 km/sec. It was shown that the electrode with positive potential was more effective than that with negative potential for positive-ion acceleration in laser induced plasma, or pulsed plasma, in which ions were induced with the Coulomb explosion following electrons. In addition, the ion-acceleration or deceleration strongly depended on conditions of pairs of inner diameter and electrodes gap.

## 1. はじめに

近年、マイクロ衛星、ナノ衛星などの小型人工衛星が注目されてきている。特に各主要要素技術については、精密加工技術の進歩に伴い各種小型デバイスの小型化が可能となった背景と、これらの更なる小型化の挑戦もあって各国で開発が進められている。各種要素の小型化は、打ち上げ総重量の軽量化、そのことによるミッションコストの削減につながる。この場合の小型化とは、単にサイズを縮小して軽量化するだけではなくシステム全体の低電力化・高効率化も含まれている。これまで、多くの小型衛星には推進システムが搭載されていなかった。しかしながら、将来的にはミッションに応じて、これによる姿勢および軌道の高い制御性が必要な場合が生じてくる<sup>1)</sup>。

質量が大幅に制限される小型衛星においては、推進装置として比較的高い比推力が得られる電気推進を用いるのが適当である。これまで、消費電力が100W程度以下の超小型推進システムについて、イオン推進器、FEPP, PPT, レジストジェ

ット、アークジェットなど、様々な電気推進装置が各国で研究されている。

小型レーザー推進器は、このような状況と、一方でレーザー装置の大幅な高出力化、高効率化および小型化に伴い、高比推力、推力制御性、小型・軽量などの利点から近年注目が高まり、数々の基礎研究が進められている。レーザー推進の関連研究は、誕生した当初の概念がそうであったように、地上ベースで飛行体の外部からレーザーを投入する場合が主として検討されてきた。これに対して近年の装置の小型化により、レーザーを推進装置の一部に組み込むシステムについても検討されるようになってきた<sup>1)</sup>。このようなオンボード型のレーザー推進機(OLAT, On-Board Laser Ablation Thruster)については、これまでPhipps等による半導体レーザーを用いたシステム<sup>2)</sup>、ならびにGonzales等によるマイクロチップレーザーを用いたシステム<sup>3)</sup>などが提案されている。各種小型推進機と比較した場合の推進特性を、Fig.1に示す<sup>3)</sup>。小型レーザー推進機の主たる特徴は、高い比推力が達成可能であることと、推力レベルを小さくできることである<sup>1-3)</sup>。

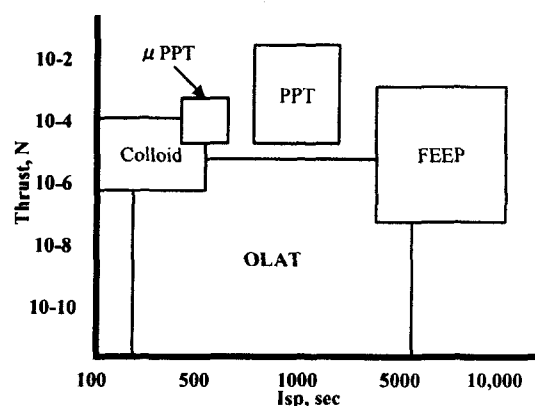


Fig.1 Application niche for On-Board Laser Ablation Thruster.

このような状況の中で、我々は、レーザー/電気複合型推進機を提案してきた<sup>4-6)</sup>。これはレーザーアブレ

ーションで噴出するプラズマを電氣的に加速することで、推進性能の向上をはかることがねらいである。電氣的加速方法としては、電磁加速<sup>4-6)</sup> および静電加速があげられる。本研究ではFig.2 に示すような加速電極を設置した静電加速方式について検討した。この方式の特徴は、固体推進剤が利用可能なので、推進剤を選ばず、かつ小型化が容易であること、レーザーアブレーション・プラズマが秒速数十kmの初速を持っており、高比推力が期待できること、などがあげられる。さらに推進機に限らず、産業応用の見地からは、微小スポットからプラズマが噴出するので、収束イオンビームなどにも利用可能と考えられる。

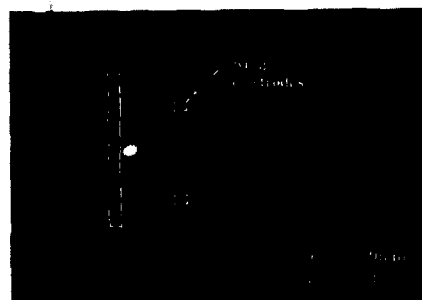
## 2. 実験装置および方法

### 2.1 レーザアブレーション・プラズマの静電加速

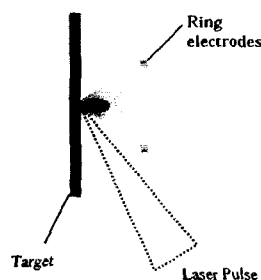
Fig.2(b)は本研究で用いた加速機構の概略図である。また、Fig.2(a)は作動中の写真である。レーザーエネルギーが小さいので(40  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ )、非常に小さいプラズマであることがわかる。ここでは、ターゲットすなわち推進剤には厚さ 0.3 mm の銅板を用いた。加速電極には、銅製リング(内径:4, 8, 12 mm の3種類、厚さ:各々1 mm)を使用した。また、ターゲット-加速電極間距離は 2.5 ~ 20 mm に変化させ、電極に印加する加速電圧は、-1000 V ~ +1000 V とした。

### 2.2 マイクロチップレーザー

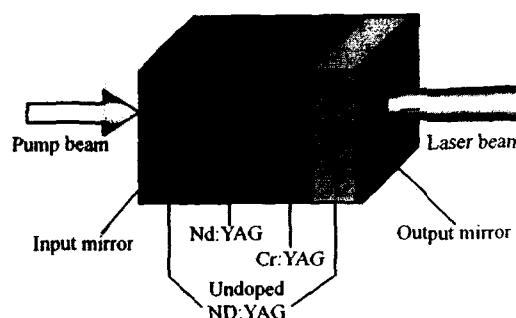
本研究では、レーザー装置としてマイクロチップレーザーを用いた。このレーザーは 1994 年にMITで発明された固体レーザーで、共振器長 1~12 mm、同断面 1~2 mm角と非常に小型である。これを数W程度の半導体レーザーで励起することにより、電氣的なスイッチングなしでパルス幅 200~300 psec、エネルギー15~250  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 程度のビームを 1~70 kHzの高繰り返しで発振が可能である。パルス幅が短いことから比較的ピークパワーの高いビームの発振が可能である。高ピークパワーのレーザーなので、従来の固体レーザーと比べて、推進剤として金属などを含む様々な材料を使用することが可能である。さらにアブレーションされるブルームは、クーロン爆発の寄与により、ターゲット表面に対して比較的垂直にしかも収束した形で生成される傾向にある<sup>3)</sup>。



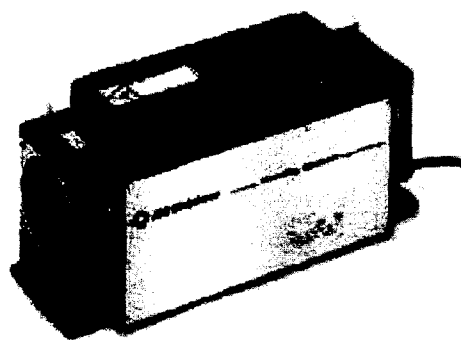
(a) Photo of Laser Induced plasma



(b)Schematics of an electro-static ion- accelerator  
Fig.2 Schematics of thruster



(a) Microchip laser oscillator.



(b) Photo of a laser system.  
Fig.3 Microchip laser (Diode pumped solid-state power chip Nano-Laser).

本実験では JDS 社製の波長 1,064 nm, パルス幅 < 250 psec, 1 パルス平均エネルギー 40  $\mu$ J, 繰り返し周波数 1 kHz のマイクロチップレーザを用いた. Fig.4 に本実験で用いたレーザ共振器の概略図と外観写真を示す. このレーザのサイズは, 電源を含めて 311 $\times$ 100 $\times$ 149 mm で, 重量 5 kg, 電源電圧 24 V と従来のレーザ装置と比べて格段に小型である.

### 2.3 イオン電流の時間変化測定

Fig.4 はイオン電流の時間変化計測用実験装置の概略図である. 図に示すように, 本実験はステンレス製真空チャンバ内 (長さ 1m  $\times$  直径 0.6m, 真空度  $1.7\sim 2.9\times 10^{-3}$  Pa) で行った. レーザ光は, 真空チャンバ窓から導入し, アルミミラーで反射し, 集光レンズ (焦点距離 40 mm) により, パワー密度  $1\times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> にて, ターゲットに集光し, アブレーションさせた. 本実験では, レーザを 1 発照射した際に加速されるイオンのイオン電流の時間変化を測定するために, 2 枚のグリッドを備えたファラデーカップを使用した. ファラデーカップは, ターゲットから 120 mm に配置し, イオン電流はオシロスコープ (Lecroy 9374TM, 1ns/div) にて測定した.

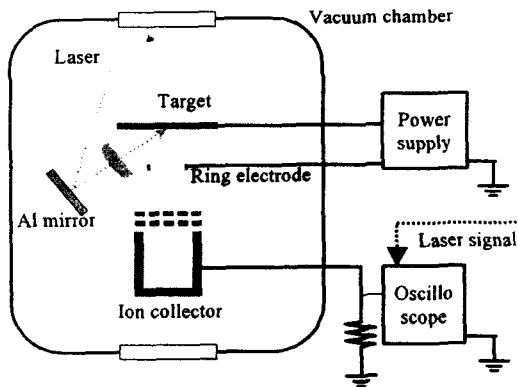


Fig.4 Schematics of experimental set up

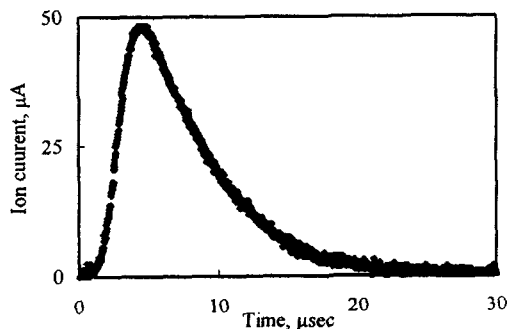


Fig.5 Temporal variation of ion current

ファラデーカップについては, プラズマに面した 1 枚目のグリッドは, グランド電位にした. また, このグリッドは 2 枚目のグリッドにイオンが衝突することによる二次電子放出を防ぐ効果もある. 2 枚目のグリッドは, 1 枚目のグリッドとファラデーカップの間で, 電位を -100V にすることにより 1 枚目のグリッドを通り抜けた高エネルギー電子を遮断し, イオン粒子だけをコレクターで捕捉できるようにした.

### 2.4 イオン平均速度の見積り

ファラデーカップに進入するイオン電流の時間変化波形 (例えば Fig.5) から, イオン平均速度の評価を行った. すなわち, イオン速度  $v$  はターゲットからファラデーカップまでの距離  $L$  およびその飛行時間  $T$  より計算した.

Bato<sup>7)</sup>によるとファラデーカップに進入する電流は, イオン電流  $I_i$  は, イオン価数  $Z$ , 電荷  $e$ , イオン個数を  $N_i$  とすると,

$$I_i = Ze \frac{dN_i}{dt} \quad (1)$$

となる. また, イオン速度とイオン個数は以下のよう表すことができる.

$$\frac{dN}{dv} = \frac{\partial N}{\partial t} \frac{dt}{dv} = \frac{I}{Ze L} \quad (2)$$

ここで  $L$  はターゲットからファラデーカップまでの距離である.

さらにイオン平均速度  $v$  は

$$v = \frac{\int \frac{\partial N}{\partial v} v dv}{N_c} \quad (3)$$

というように表すことができる. ここで  $N_c$  はイオンコレクタに流入するイオンの総数である. レーザの 1 パルスあたりのエネルギーが小さいのでイオンはすべて一価のイオンと仮定した.

さらに, イオンの速度を計測するためにファラデーカップの位置を 20 mm, 70 mm の 2 通りの場合のイオン電流を計測し, その距離差および時間差から飛行時間 (Time-of-flight) を計測することで速度  $v$  を見積った.

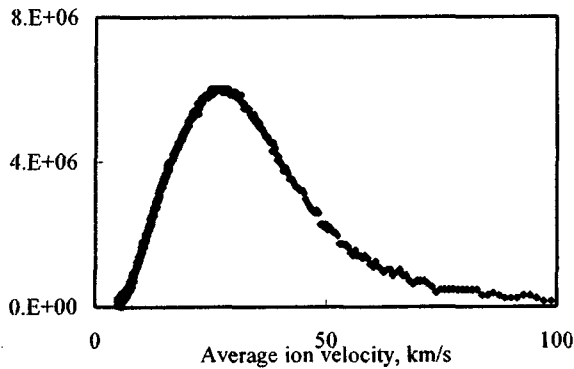


Fig.6 Average ion velocity distribution

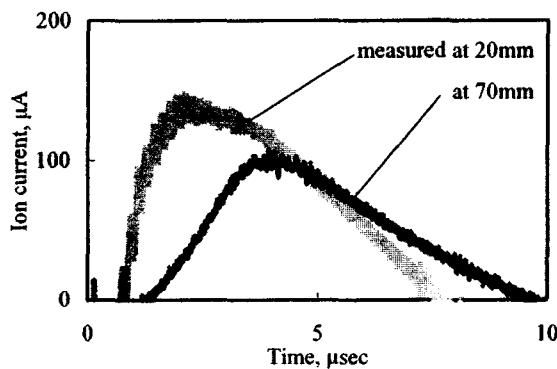


Fig.7 Temporal variation of ion current measured at different positions

Table.1 Ion velocities in pure laser ablation.

	Velocity [m/s]
TOF	$2.7 \times 10^4$
Ion velocity distribution peak	$2.6 \times 10^4$
Average velocity	$2.2 \times 10^4$

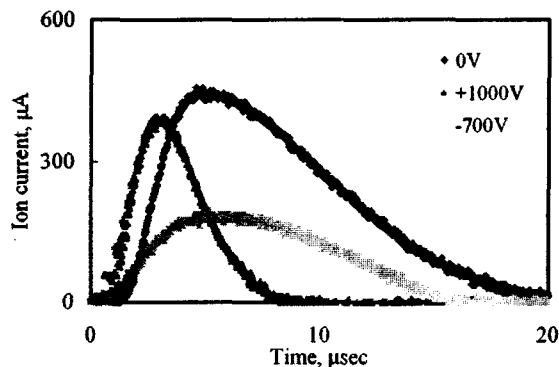


Fig.8 Temporal variation of ion current for various acceleration voltages (electrodes gap: 15mm, inner diameter: 8mm)

### 3. 結果および考察

#### 3.1 イオン速度

レーザアブレーションにより発生・噴出したイオンの速度を3種類の方法で見積った。すなわち、(1)2通りの計測位置におけるイオン電流(Fig.7)のピーク値を示す時間の時間差および距離差からTOF法で算出した速度と、(2)イオン電流の時間変化測定結果から式(2)を用いて算出したイオン速度分布(例えばFig.6)における分布のピークを示す速度と、(3)イオンの速度分布から式(3)を用いて平均した速度とを比較・検討した。それぞれの結果をTable.1に示す。これらの結果から、TOF法で求めた速度と速度分布のピーク値を与える速度は、ほぼ同程度であることがわかる。また、速度分布を平均して求めたイオン平均速度は、若干低い値となっているが、同程度であることが分かる。推進性能などに関係してくるのは、平均速度であると考えられるので、本研究ではこの方法により求めた値をイオン速度として採用することにした。

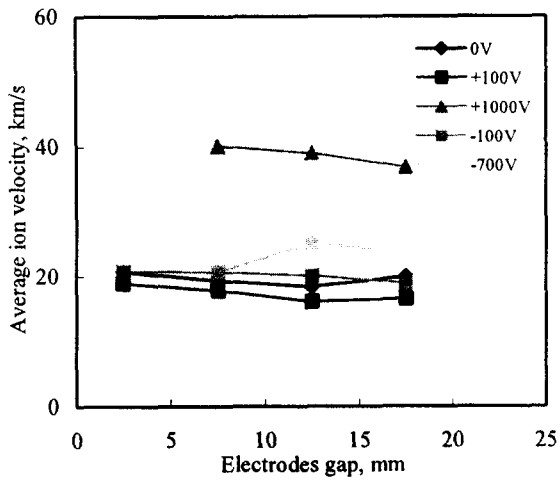
#### 3.2 加速電圧がイオン速度に及ぼす効果

Fig.8は、内径8mmの加速電極を、電極間距離15mmに配置して、加速電圧をそれぞれ-700V, 0V, +1,000V印加した場合のイオン電流波形である。加速電圧が0Vの場合、イオン平均速度19.5km/sであった。Table.1の結果と比較すると、電極(0V)を配置しただけで、速度が10%程度減少している。

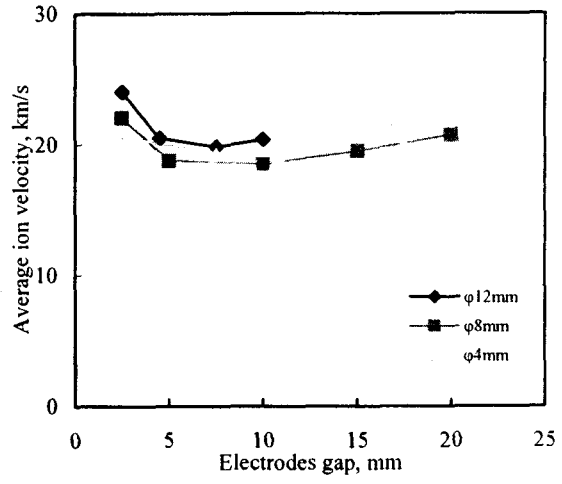
加速電圧が-700Vの場合、全体のイオン電流量は減少していることがわかる。一方、イオン電流の立ち上がりは、電圧を印可しない0Vの場合と比べて約0.3μs速くなっていることが確認された。この場合のイオン平均速度は21.9km/sであり、0Vの場合より、約10%加速されていることがわかる。

一方、加速電圧を+1000Vにすると、イオン電流の立ち上がりは、電圧を印可しない0Vの場合と比べて約0.7μs速くなっているのが確認された。ファラデーカップが捕捉したイオン電流の時間変化波形は、0Vの場合と比べると左にシフトしているのがわかる。すなわち、加速電圧を印可しない場合に比べて、早い時間に多くのイオンが到達しているということである。このときの、イオン平均速度は39.2km/sであり、0Vの場合より、約2倍の速度に加速されていることがわかる。

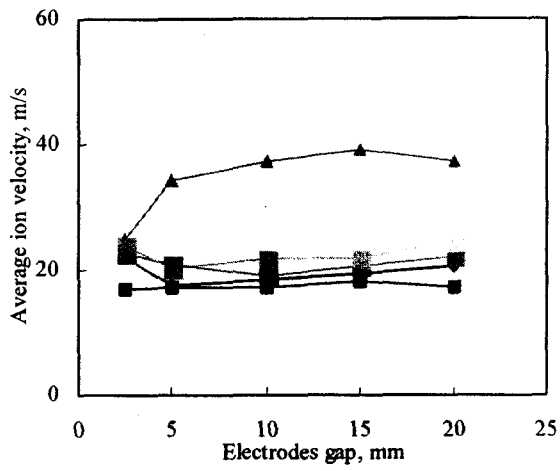
これらの結果から、この場合のイオンの加速に対しては、一般的な静電加速とは大きく異なり、加速電圧をマイナスではなく、むしろプラス側にした方がより有効であることが明らかになった。



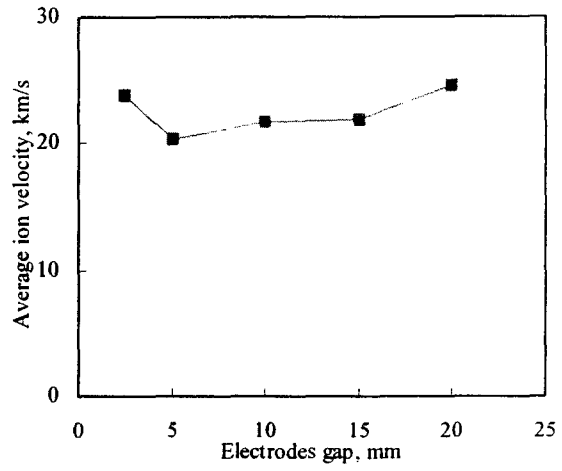
(a) Inner diameter: 4mm



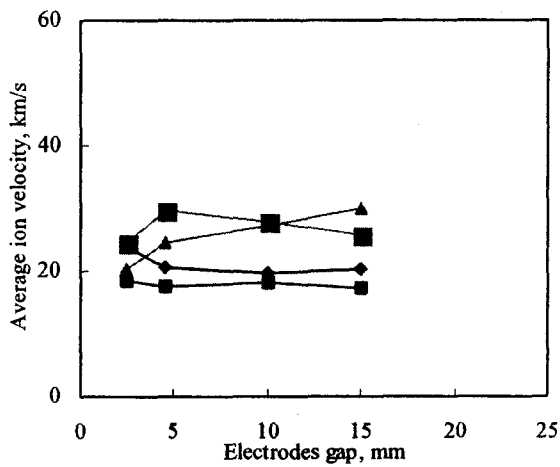
(a) Acceleration voltage: 0V



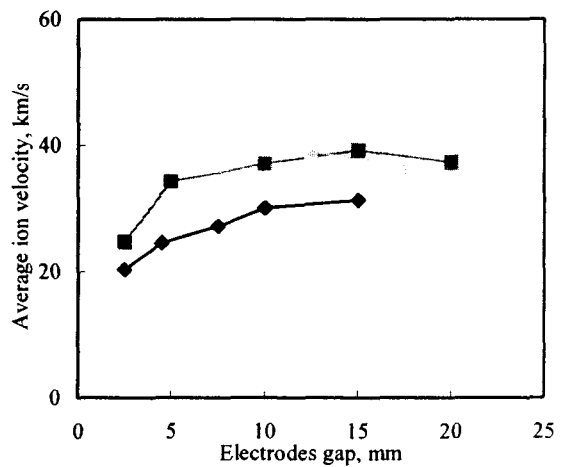
(b) Inner diameter: 8mm



(b) Acceleration voltage: -700V



(c) Inner diameter: 12mm



(c) Acceleration voltage: +1000V

Fig.9 Effects of electrodes diameters on ion velocity

Fig.10 Effects of electrodes voltages on ion velocity

### 3.3 加速電極内径と電極間距離の効果

リング状加速電極の内径を変えた場合の電極間距離に対するイオン平均速度の変化を Fig.9(a)~(c) に示す。Fig.9(a)内径 4 mm の場合、イオン平均速度は、加速電圧が $-700\text{ V} \sim +100\text{ V}$ の間では電極間距離によらずほぼ一定で約  $20\text{ km/s}$  である。一方、加速電圧が $+1000\text{ V}$  の場合、平均速度は  $40\text{ km/s}$  程度から電極間距離の増大に伴って緩やかに減少する傾向にある。ここで、電極間距離が  $5\text{ mm}$  以下のプロットがないのは、加速電極とターゲット間で放電が発生してしまったためである。

Fig.9(b)内径  $8\text{ mm}$  の場合においても、イオン平均速度は、加速電圧 $-700\text{ V} \sim +100\text{ V}$  までは電極間距離によらず内径  $4\text{ mm}$  と同様に、ほぼ一定 (約  $20\text{ km/s}$ ) であった。一方、加速電圧が $+1000\text{ V}$  では、電極間距離が小さい場合、約  $20\text{ km/s}$  程度であるが、 $5\text{ mm}$  では約  $35\text{ km/s}$  と電極間距離の増大に伴って増大し、 $15\text{ mm}$  では最大値約  $40\text{ km/s}$  となり、それ以上では若干減少している。

Fig.9(c)内径  $12\text{ mm}$  の場合、イオン平均速度は、加速電圧が  $0\text{ V} \sim +100\text{ V}$  の場合は、電極間距離によらず約  $20\text{ km/s}$  一定である。一方、加速電圧が $-100\text{ V}$  の場合、電極間距離  $4.5\text{ mm}$  で最大値約  $25\text{ km/s}$  を示す傾向が見られる。さらに、加速電圧が $+1000\text{ V}$  の場合、電極間距離を大きくすると平均速度も増大する傾向にある。

Fig.10 には典型的な加速電圧の各場合における各種加速電極内径についての電極間距離に対するイオン平均速度の変化を示した。Fig.10(a)加速電圧  $0\text{ V}$  の場合、いずれの内径においても電極間距離が  $5\text{ mm}$  以下の場合、ターゲットの前に電極があるだけで平均速度が上昇し、一方、電極間距離が  $5\text{ mm}$  以上になると距離の増大に伴って平均速度が徐々に減少していき、 $\phi 4\text{ mm}$  では電極間距離  $12.5\text{ mm}$ 、 $\phi 8\text{ mm}$  では電極間距離  $10\text{ mm}$ 、 $\phi 12\text{ mm}$  では電極間距離  $7.5\text{ mm}$  においてそれぞれ極小値を示し、それ以上の場合では、再度平均速度が上昇している。

Fig.10(b)加速電圧 $-700\text{ V}$  の場合、 $0\text{ V}$  の場合とほぼ同様の傾向を示しているが、全体的に速度が  $15\%$  程度増大している。

Fig.10(c)加速電圧 $+1000\text{ V}$  の場合、加速電極の内径ならびに電極間距離が小さい場合においてイオン平均速度が高い傾向が認められる。また、加速電極内径が大きい場合、速度の最大値は電極間距離が増大する方にシフトしている。これらの

ことから、作動条件によって、加速電極内径および電極間距離について、最適な条件が存在するものと考えられる。例えば、内径  $8\text{ mm}$  の場合、電極間距離  $15\text{ mm}$  程度が適当といえる。

一般的に、このような短パルスレーザー照射によるレーザーアブレーションでは、レーザー照射直後(あるいはほぼ同時に)、(1)表面から電子が放出され、次いで(2)照射点に残された正イオン同志がクーロン力を及ぼし合うこと、ならびに(3)前出の電子と静電的に引き合うことで、照射点から爆発的にイオンが放出される、いわゆるクーロン爆発によりイオンが運動エネルギーを得る効果が支配的といわれている<sup>8)</sup>。

加速電極が  $0\text{ V}$  の場合、この電位がプラズマの空間電位と一致しているとはいえない。従って、この場合これらが異なることが、電極の位置によって、イオンの速度を加速/減速する方向に作用している可能性があるといえる。加速する場合(例えば、Fig.10(a)で各種内径において加速電極位置がターゲット表面に最も近い場合( $2.5\text{ mm}$ )), (1)で発生した電子の一部は電極に付着し負に帯電させるので、(3)の静電力の寄与を高めると考えられる。一方、減速する場合(例えば、Fig.10(a)で各種内径において電極間距離を広げた場合( $> 5\text{ mm}$ )), (1)で発生した電子の一部は電極に付着し負に帯電させるのが、距離が大きくなるに従い(3)の静電力の効果が小さくなるといえる。

加速電圧がマイナスの場合、(1)で発生した電子は、電極から斥力を受けターゲット側あるいはその逆の前方向に加速される。一方、(2)、(3)で放出された正イオンは、負電位の電極により静電的に引き出され加速される。この時、一部は電極に衝突するものと考えられる。これらの効果により、イオンはある程度加速されるが、全体的なイオン電流は著しく減少するものと考えられる。

一方、加速電圧がプラスの場合、(1)で発生した電子の一部は、電極側に加速される。一方、(2)、(3)で放出された正イオンは、正電位の電極により静電的に斥力を受ける。この時、多くの正イオンは秒速  $20\text{ km}$  程度の初速を持っているので、この斥力により電極から弾かれることで前方向に加速されるものと考えられる。一部のイオンは、この斥力により、ターゲット方向に戻されようとするが、初速を持つ正イオンと反発し合うことにより、結局は前方向に加速されるものと考えられる。しかしながら、現時点では、これらの機構の詳細は不明であり、さらなる診断が必要と考えられる。

#### 4. まとめ

レーザ/電気複合型推進機の一つとして、レーザアブレーションで噴出するプラズマを静電的に加速することで、推進性能の向上を目的とした基礎研究を行った。主たる結論は以下の通りである。

- (1)本実験条件(パルスエネルギー 40  $\mu$ J/pulse, パルス幅 250 psec)において、レーザアブレーションのみのイオン平均速度が約 20km/s であるのに対し、静電的な作用(加速電極に+1,000 V 印加)で、約 2 倍以上(約 40km/s)に加速可能であることが確認された。
- (2)レーザアブレーション・プラズマを静電加速する場合、加速電極の電位はターゲットに対して負の場合よりもむしろ正の場合の方が有効であることが確認された。
- (3)加速電極内径ならびにターゲットからの電極間距離には最適値がある。

#### 参考文献

- 1) 堀澤秀之：小型レーザプラズマ推進機，日本航空宇宙学会誌 54 (594), pp.191-196, 2003.
- 2) Phipps, C., and Luke, J., "Diode Laser-Driven Microthrusters: A New Departure for Micropropulsion", *AIAA Journal*, Vol.40, No.2, 2002, pp.310-318.
- 3) Gonzales, D., and Baker, R., "Microchip Laser Propulsion for Small Satellites," AIAA Paper 2001-3789, 2001.
- 4) Horisawa, H., Kawakami, M., Lin, W.-W., Igari, A., and Kimura, I.: Discharge Characteristics of a Laser-Assisted Plasma Thruster, IEPC 03-0075, 2003.
- 5) Horisawa, H., Kawakami, M., Lin, W.-W., Igari, A., and Kimura, I.: Fundamental Study of a Laser-Assisted Plasma Thruster, Beamed Energy Propulsion, AIP Conference Proceedings 664, pp.423-432, 2003.
- 6) Kawakami, M., Lin, W.-W., Igari, A., Horisawa, H., and Kimura, I.: Plasma Behaviors in a Laser-Assisted Plasma Thruster, AIAA2003-5028, 2003.
- 7) Bato, M., Uchida, S., Shimada, Y.: Measurements of Laser Intensity Dependence of High Specific Impulse for Laser Ablative Propulsion, Pro.2nd ISBEP, 2003. (to be published).
- 8) 村上浩一：レーザ光と固体との相互作用，プラズマ核融合学会誌 79 (10), pp.1035-1042, 2003