

レーザー誘起プラズマを利用した静電加速型推進システム

Study of Electrostatic Acceleration Propulsion System using Laser Ablation Plasma

○枝村 亮・納村 聡太・土谷 純一・堀澤 秀之 (東海大学)

○Ryo Edamura・Akihiro Osamura・Junichi Tsuchiya・Hideyuki Horisawa (The University of Tokai)

Abstract (概要)

The laser ablation plasma was diagnosed by the single probe measurement as a fundamental study on the laser-electrostatic hybrid thruster. The experimental setup was composed of a solid propellant (Cu), an acceleration electrode, and an Nd:YAG laser device. Electron temperature and density of the laser-ablation plasma were obtained by the single probe measurement. It was shown that at 10 mm and at 100 mm away from the target, the electron temperature was about 0.8 ~ 2.8 eV. Moreover, the electron density decreased with probe position. And, debye length increased with probe position. As an applied study, we diagnosed the laser ablation plasma by the triple probe. We experimentally estimated the ion energy distribution in a laser-electrostatic hybrid thruster using a retarding potential analyzer. From the ion energy distributions, the most probable velocities of ions were estimated. It was shown that the velocities of ions increased (from 31 to 51 km/s) with augmentation of acceleration voltages (from).

1. はじめに

近年、小型で軽量の超小型人工衛星の研究・開発が盛んに行われている。これまで多くの小型衛星には姿勢・軌道制御用の推進システムが搭載されてこなかった。しかしながら、将来的には多様化するミッション要求に応じてその必要性は益々高まってきている¹⁾。このような衛星は質量に大幅な制限を受けるため、小型かつ高性能の推進システムを構築する必要がある。そこで、我々が注目しているのがオンボード型の小型レーザー推進機である²⁾。このタイプ推進機は、近年のレーザー装置の大幅な小型・高出力化及び高効率化に伴い注目が高まり、小型・軽量かつ高比推力で推力制御が容易な推進機として、研究が進められている^{2)~4)}。このような状況で我々は、固体推進剤にレーザーを照射して生成したプラズマを、加速電極を用いて電氣的に加速(静電加速あるいは電磁加速)することで、推進性能向上の可能性を検討してきた^{4~8)}。

本研究では、静電加速方式⁸⁾に着目し、第一に、基礎研究としてレーザー誘起プラズマのシングルプローブおよびトリプルプローブによる診断を行った。これらのプローブ診断で得られた結果をもとにイオンエネルギーアナライザ (Retarding potential analyzer, RPA) を用いて、イオンエネルギー分布からイオンの速度分布を計測し、種々の条件における静電加速特性について比較・検討した。

2. 静電加速型レーザー・電気複合推進機

図1にレーザー誘起プラズマの静電加速機構の模式図を示す。推進機は板状陰極の銅板ターゲット(推進剤)と、銅板に単円孔を開けた加速電極で構成される。レーザーをターゲット表面に集光・照射することで、加速チャンネル内にプラズマ(推進剤)が供給される。このときレーザー照射直後にターゲット表面からは、まずレーザー光により励起された電子が放出され、次いで取り残された正イオン同士がクーロン力を及ぼし合うこと、ならびに前出の電子と静電的に引き合うことでイオンが加速される。本研究で提案する方式は、このように初速度を持ったレーザー誘起プラズマを追加的に静電場でさらに加速する。従って、より高い速度のイオンの生成が可能で、高比推力が期待できる。

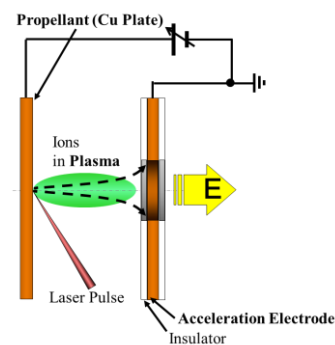


図1 静電加速型レーザー・電気複合推進機の機構

3. 実験装置および方法

3.1 Nd:YAG レーザ

本研究で使用したレーザ発振器を図2に示す。本研究では、固体レーザの一種であるNd:YAGレーザ（LAMBDA PHYSIK社製、型番BRILLIANT LPY-150）を用いた。パルスエネルギーは340 mJで、パルス幅は5 nsである。表1に仕様を示す。



図2 Nd:YAG レーザ

表1 Nd:YAG レーザの仕様

平均パルスエネルギー	340mJ
繰り返し周波数	10Hz
パルス幅	5ns
ピークパワー	0.17GW
ビーム径	7mm

3.2 シングルプローブによるプラズマ診断

シングルプローブによるプラズマ診断装置の概略図を図3に示す。シングルプローブを使用し、静電的に加速する前の、純粋なレーザ誘起プラズマの各パラメータ（電子温度、電子密度、Debye 長など）の時間的・空間的变化を測定した。本実験はステンレス製真空チャンバ内（長さ1m×直径0.6m、真空度 $2.3\sim 3.0\times 10^{-6}$ torr）で行った。レーザ光は、真空チャンバの石英窓より導入後、アルミミラーで反射し、石英ガラス製の集光レンズ（ $f=110$ mm）によりパワー密度 0.2×10^{12} W/m²にて、ターゲット表面に集光してアブレーションさせた。ターゲット（推進剤）には厚さ $t=1$ mmの銅板を用い、照射点が常に同一条件となるように、ターゲット走査用x-yステージ上で駆動させた。シングルプローブには、直径0.5 mm×長さ5.0 mmのタングステン丸棒を用いた。プローブは、プローブ移動用x-yステージを用いてレーザアブレーションプラズマの中心軸上を移動させ、各位置におけるプラズマ診断を行った。一般的に、シングルプローブによるプラズマ診断では、時間変化の小さい定常なプラズマを対象としている。これに対して、本研究で扱うレーザ誘起プラズマは、高時間分解診断が必要となる。本実験では、パルスごとのプラズマの状態に大きな相異がなく、現象の再現性が高いことを利用して、次の手順で診断した。まず、プローブの各バイアス電圧（+20～-20V）におけるプローブ電流の時間変化波形をそれぞれオシロスコープ（Tektronix, TDC3034B、帯域幅0～300MHz）で取得した。次に得られた各バイアス電圧におけるプローブ電流の時間変化から、任意の時間における電圧と電流の関係を輪切りにすることで、その時間における電圧-電流特性（ V_p-I_p 特性）を得る。この V_p-I_p 特性から、電子温度、電子

密度、およびデバイ長を算出した⁹⁾。同様の処理を対象とする時間領域にわたって遂行することで諸量の時間変化をプロットした。

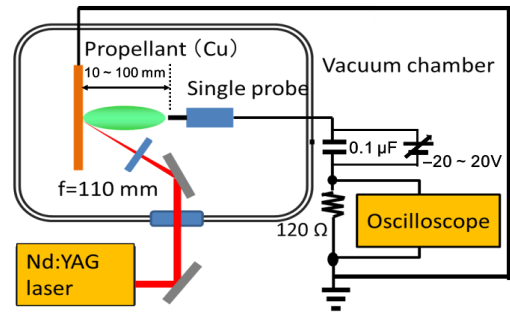


図3 シングルプローブによるプラズマ診断実験装置図

3.3 トリプルプローブによるプラズマ診断

トリプルプローブによるプラズマ診断装置図を図4に示す。シングルプローブによるプラズマ診断と同様に、電気的に加速する前の純粋なレーザ誘起プラズマの所領の時間的診断を行った。トリプルプローブ法は、瞬間測定法とも呼ばれ、3本のプローブを同時に用いて、プローブ間に一定の電圧を印加し、プローブに流れる電流の瞬時値から各プラズマパラメータを求めるものである⁹⁾。シングルプローブ法と異なり、電圧-電流特性のプロットを必要としないので、データ処理の手間が省けるだけでなく、nsecオーダーの極めて速い現象や再現性のない現象の測定が可能であり、空間電位差が無視できるほど小さい、例えば、アブタグロープラズマや、レーザ生成プラズマ、熱電離プラズマのように、プラズマ中にほとんど電界が存在しない場合の測定には、極めて便利で有効な手段である⁹⁾。

本実験では、プローブ間に固定電圧（3Vと20V）を印加し、プローブ間を流れる電流 I_2 、 I_3 の瞬時値をオシロスコープで計測した。なお、3本の探針の位置におけるプラズマがすべて等しい条件にあることが前提であるため、プラズマに対して同一断面内に3本の探針が収まるようにターゲットに垂直な方向から挿入した。また、各プローブには、直径0.15 mm×長さ10 mmのタングステン丸棒を用いた。また、シース長さを考慮して探針間隔は1.5 mmと十分に開けた。

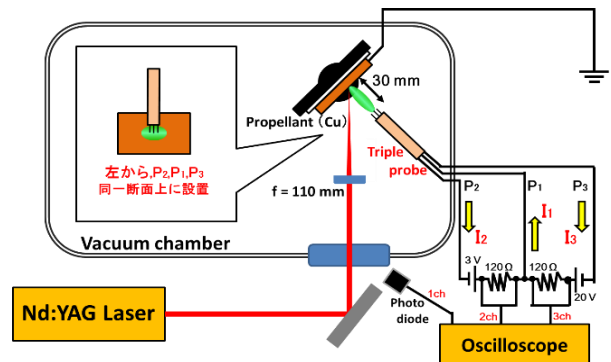


図4 トリプルプローブによるプラズマ診断実験装置図

3.4 RPAによるイオン速度分布計測

RPAによるイオン速度分布計測実験装置図を図5に示す。本実験においては、前節までのレーザアブレーションプラズマの診断と異なり、プラズマをさらに静電場によって加速するときのイオン加速特性について評価した。加速電極(孔径10mm)は、ターゲットから30mmの位置に設置した。そして、ターゲット・加速電極間には0~150Vの加速電圧を印加した。設置位置については、プローブ診断結果(図10)より判明したDebye長に近い絶縁材厚さを選定することでイオンに有効に静電力が作用して加速できる。また、プローブ位置30mmのときのDebye長(約200μm)までならば、同じ厚さの絶縁材を製作できる(これより薄いと製作が困難)。本研究では、より多くのイオンを効率的に加速するためには、ターゲットから30mmの位置に加速電極を設置するのが最適だと判断した。

本実験で用いたRPAは3枚のグリッドからなる。1枚目(1番外側)のグリッドは、流入してくるプラズマの擾乱を防ぐために電氣的に浮かせ、2枚目のグリッドには十分な負の電位(-25V)を印加して電子電流の除去を行った。3枚目のグリッドに0~1000Vの電圧を50V刻みで印加して、この障壁を越えてきたイオン電流をコレクタ部で捕集し、オシロスコープで計測した。なお、コレクタ部には、2枚目のグリッドへのイオン衝突で放出される2次電子を除去するために、負の電位(-25V)を印加した。なお、この負電位の値(-25V)は、プローブ診断で得られた電子温度から選定した。

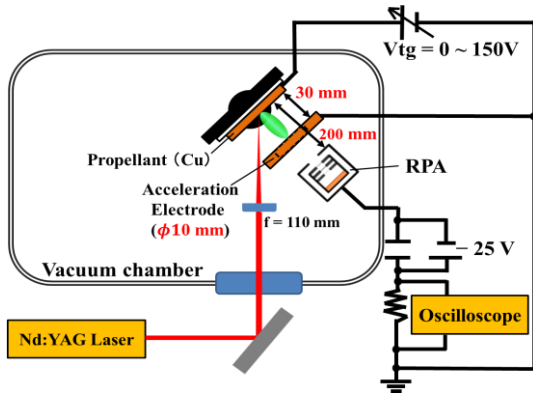


図5 RPAによるイオン速度分布計測実験装置図

4. 実験結果および考察

4.1 シングルプローブによるプラズマ診断

図6は、各プローブ電圧におけるプローブ計測電流の時間変化を示す。図6中の、任意の時間(例えば3μsec)における電圧と電流の関係を縦に輪切りにすることで、図7(a)に示すように、その時間における電圧-電流特性曲線が得られる。この図の縦軸のプローブ電流の対数をとることで図7(b)を得る。この図のプローブ電圧0V付近における勾配を求めることで式(1)から電子温度 T_e を算出した。

$$T_e = -\left(\frac{e}{k}\right)\left(\frac{dV}{d \ln I_{e0}}\right) \quad (1)$$

また、この図より飽和電子電流を抽出した。さらに図中に示すように、これら2本の接線の交点からプラズマの空間電位を得る。これらの値および以下の式(2)~(3)を用いて、電子密度 N_e 、デバイ長 λ_D を算出した。

$$N_e = \frac{4I_{e0}}{eSv} \quad (2)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi N_e^2}} \quad (3)$$

ここで、 e は素電荷、 k はボルツマン定数、 I_{e0} は飽和電子電流、 S はプローブ表面積、 v は電子熱速度である。この処理を対象とする全ての時間にわたって遂行することで T_e 、 N_e 、 λ_D の時間変化をプロットした。なお、

$$I_{e0} = \frac{1}{4}N_e e \bar{v}_e S = \frac{1}{4}N_e e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e}\right)^{\frac{1}{2}} S \quad (4)$$

$$I_{i0} = \frac{1}{4}N_i e \bar{v}_i S = \frac{1}{4}N_i e \left(\frac{8kT_i}{\pi m_i}\right)^{\frac{1}{2}} S \quad (5)$$

ここで、 \bar{v}_e は電子熱速度、 m_e は電子の質量、 I_{i0} は飽和イオン電流、 v_i はイオン熱速度、 N_i はイオン密度、 T_i はイオン温度、 m_i はイオンの質量である。なお、プラズマは低ガス圧の無衝突プラズマで、プローブによる電子熱運動への擾乱が無視できるものとした。

各プローブ位置における電子温度の時間変化を図8(a), (b), (c)にそれぞれ示す。図に示すように電子温度はいずれのプローブ位置においても、大体0.8~2 eV程度の値を示し、時間的に減少する傾向にある。

図9には各位置における電子密度の最大値を示す。電子密度は、時間進行およびプローブ位置が遠ざかるにつれて減少傾向であり、10~30mmの間で急激に減少することが確認された。また、プローブ位置10mmではピーク値が $1.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (1μsec)で、プローブ位置100mmでは、 $0.56 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (5μsec)であった。

図10に各位置におけるデバイ長の最大値を示す。デバイ長は図に示すように、プローブ位置10mmでは、ピーク値が158μm(1μsec)で、プローブ位置100mmでは、ピーク値は363μm(5μsec)であった。

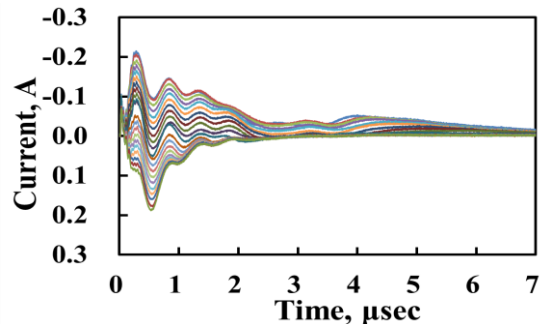
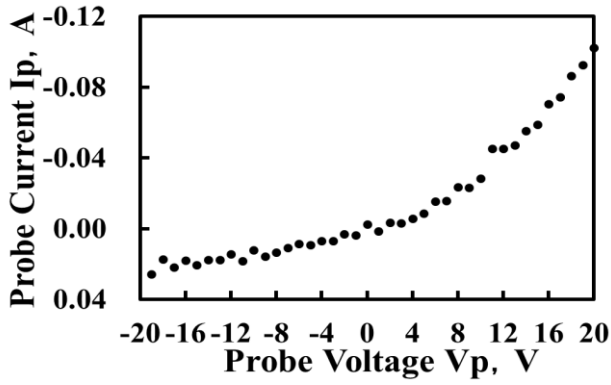
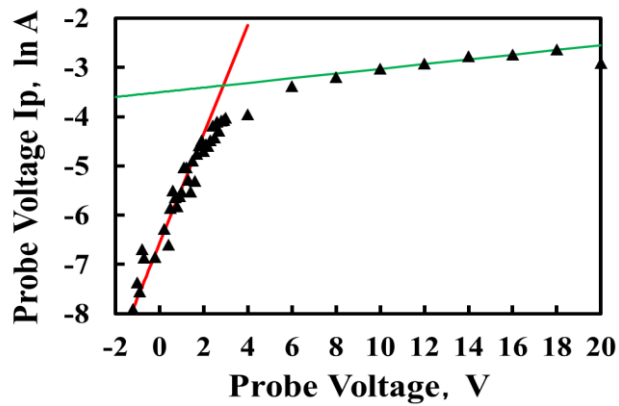


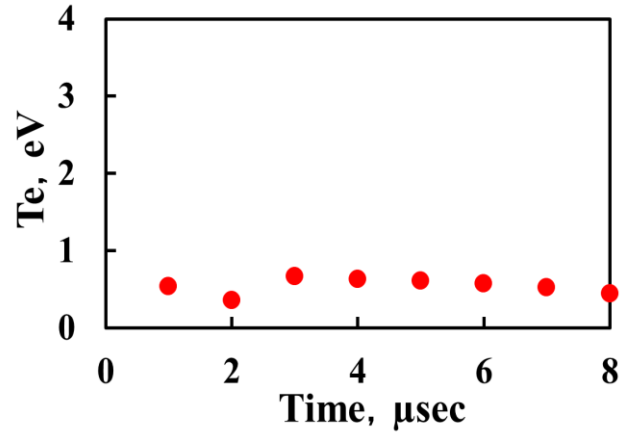
図6 各プローブ電圧におけるプローブ電流の時間変化



(a) 電圧-電流特性曲線



(b) 電圧-電流特性曲線(対数補正にて電子電流を抽出)
図7 作成した電圧-電流特性曲線(3μsec時)



(c) 電子温度の時間的変化(プローブ位置 100mm)
図8 各プローブ位置における電子温度の時間的変化

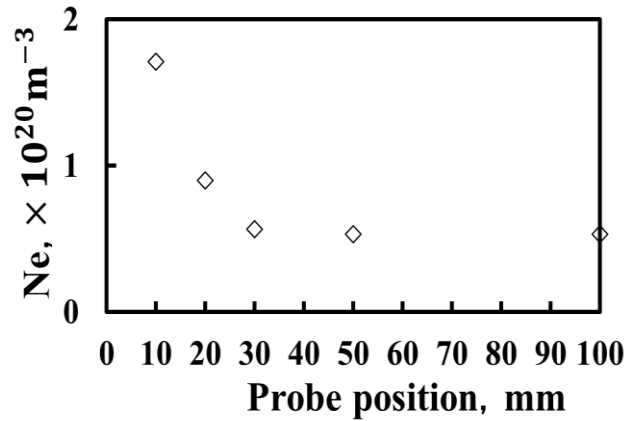
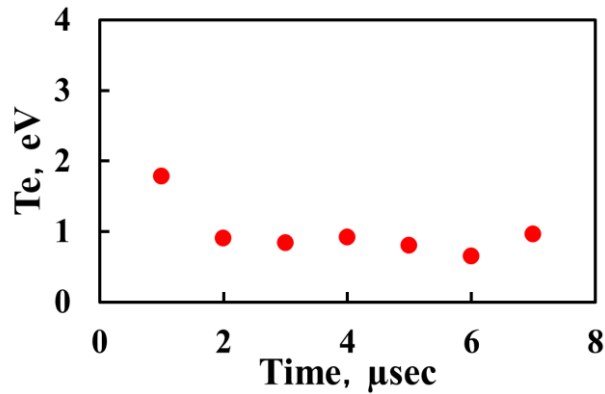
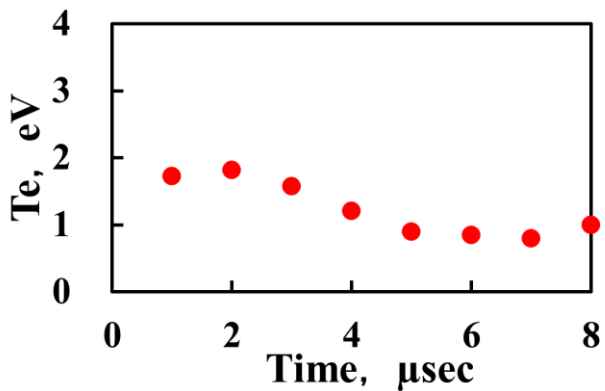


図9 各プローブ位置における電子密度の空間的変化



(a) 電子温度の時間的変化(プローブ位置 10mm)



(b) 電子温度の時間的変化(プローブ位置 30mm)

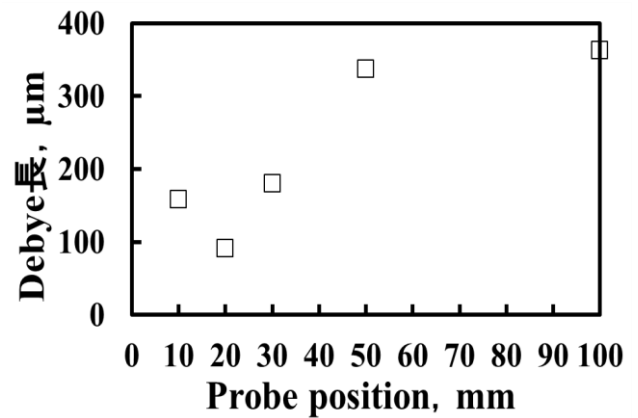


図10 各プローブ位置における Debye 長の空間的変化

4.2 トリプルプローブによるプラズマ診断

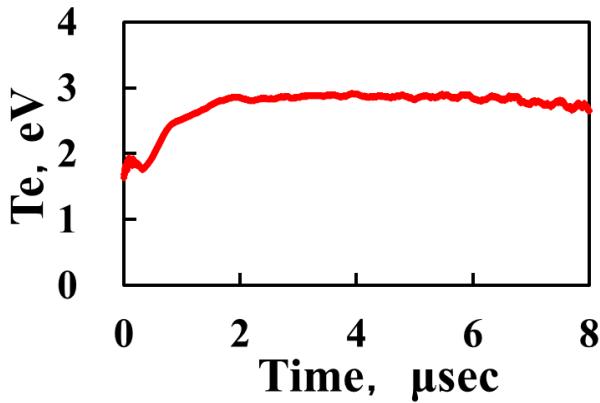
トリプルプローブ診断の結果を図 11 (a), (b), (c)に示す。本報ではシングルプローブ診断と比較するためプローブ位置 30mm の場合と比較した。なお、トリプルプローブでは、測定した電流の瞬時値と以下の 3 式から短時間でプラズマの各パラメータを算出できる。

$$\frac{k}{e} T_e = \frac{V_{d2}}{\ln\left(1 - \frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_3}\right)} \quad (eV_{d3} \gg kT_e) \quad (6)$$

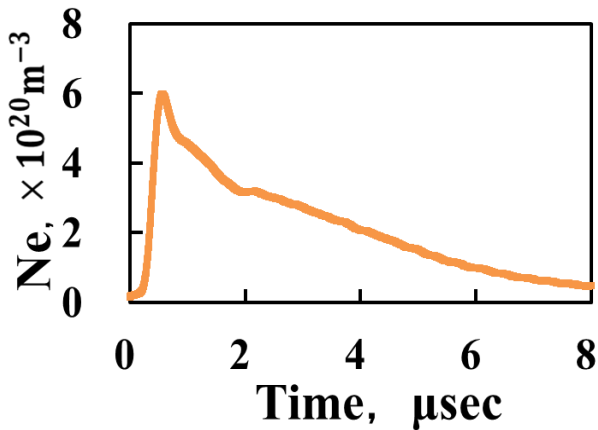
$$N_e = \frac{I_{i0}}{\kappa \times e \times S \times \sqrt{\frac{k \times T_e}{m_{i1}}}} \quad (7)$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \times k \times T_e}{N_e \times e^2}} \quad (8)$$

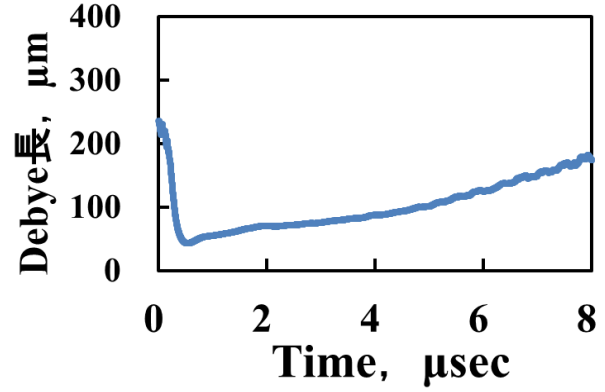
ここで、 e は素電荷、 k はボルツマン定数、 V_{d2} はプローブ P_1 - P_2 間に印加した固定電圧 3V、 V_{d3} はプローブ P_1 - P_3 間に印加した固定電圧 20V、 I_1 はプローブ P_1 に流れる電流 ($I_1 = I_2 + I_3$)、 I_2 はプローブ P_1 - P_2 間の電流の瞬時値、 I_3 はプローブ P_1 - P_3 間の電流の瞬時値、 I_{i0} はイオン飽和電流、 m_{i1} は銅イオン (1 価) の質量、 S はプローブ表面積、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。トリプルプローブによる診断結果をシングルプローブの結果と比較すると、それぞれが同程度の値を示し、時間変化の傾向も同様であることがわかる。



(a) 電子温度の時間的変化(プローブ位置 30mm)



(b) 電子密度の時間的変化(プローブ位置 30mm)



(c) Debye 長の時間的変化(プローブ位置 30mm)

図 11 トリプルプローブ診断結果

4.3 RPA によるイオン速度分布の計測

図 12 に RPA のグリッド電圧を変化して計測した各場合におけるイオン電流のピーク値をプロットした図を示す。これらの各プロットの近似曲線をグリッド電圧 V で 1 回微分した dI/dV と V をプロットすることでイオンエネルギー分布を得る (図 13)。さらに図 13 の横軸のイオンエネルギーがイオンの運動エネルギーに等しいと仮定することで、横軸をイオン速度に換算し、イオン速度分布を得る。

図 14 に各加速電圧 (0~150V) におけるイオン速度分布をそれぞれ示す。縦軸の絶対値には多少のバラつきが見られるが、相対的なイオン速度分布は測定間で大きなバラつきはないとみなした。これらの結果から、加速電圧の向上とともに、イオン速度分布のピークを与える速度 (最確速度) が右側にシフトする、すなわち平均的な速度が増大する傾向にあることがわかる。これらのイオン速度分布のプロットからイオンの平均速度を算出した。各加速電圧 (0~150 V) における平均速度と最確速度とをそれぞれ図 16 に示す。加速電圧の上昇とともに、最確速度と平均速度ともに増大することがわかる。

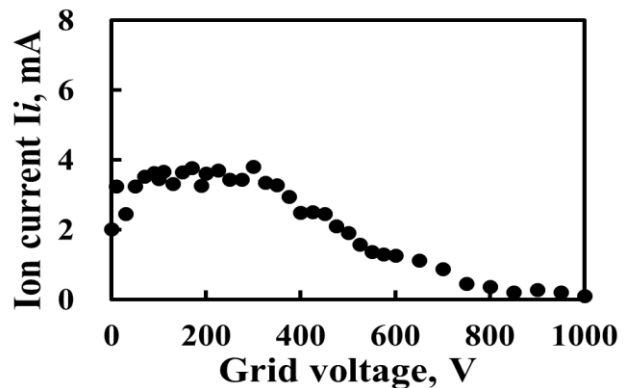


図 12 各グリッド電圧におけるイオン電流ピーク値 (加速電圧-100V)

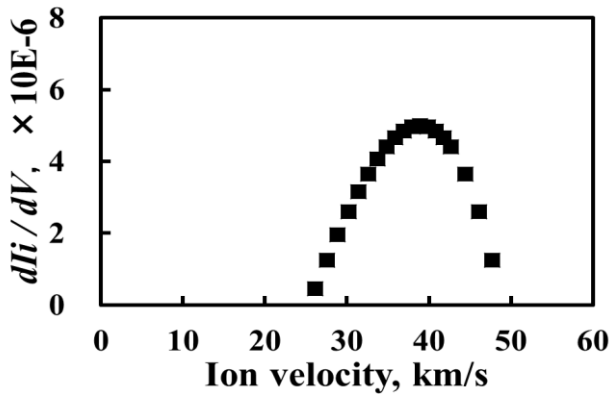


図 13 イオン速度分布(加速電圧-100V)

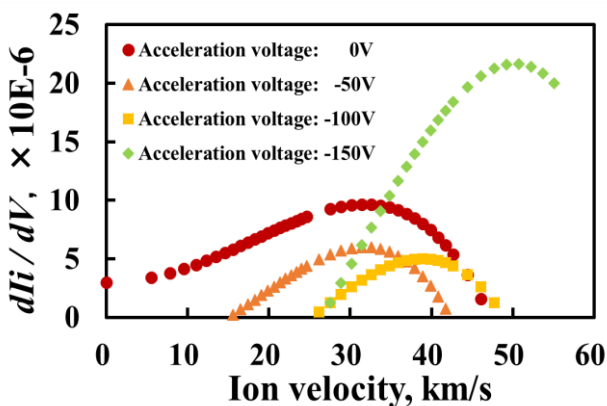


図 14 イオン速度分布(加速電圧 0~-150V)

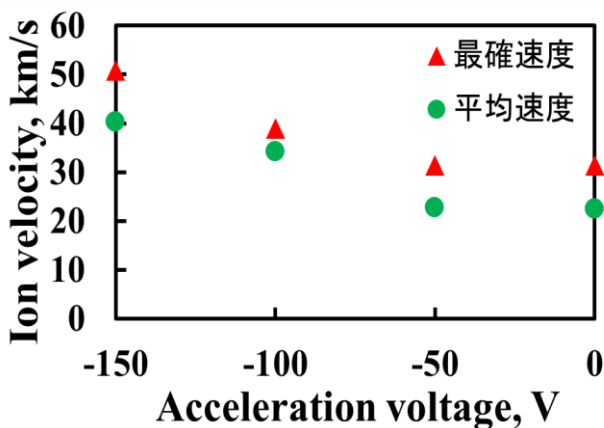


図 15 イオンの最確速度と平均速度(加速電圧 0~-150 V)

5. おわりに

レーザ誘起プラズマを利用した静電加速型推進システムの基礎研究として、シングルプローブとトリプルプローブの2種類によるプラズマ診断を行い、各プローブ位置における各プラズマパラメータ（電子温度、電子密度、Debye長）の時間的変化または空間的変化についての比較、考察を行った結果、次の結論を得た。

- (1) いずれのプローブ位置においても、電子温度は概ね 0.8 ~ 2eV 付近を示すことが確認された。
- (2) 電子密度は、時間的にも空間的にも減少傾向である。
- (3) トリプルプローブの計測結果もシングルプローブの結果と比べて大きな誤差がなかった。

また、このプローブ診断で得た結果をもとに RPA を用いて、イオンエネルギー分布を算出したうえで、イオン速度の加速特性を調べた結果、次の結論を得た。

- (4) 加速電圧-200V から放電により測定困難になった。
- (5) 加速電圧の向上とともに、イオンの最確速度と平均速度も増大した。

参考文献

- 1) Micci, M. M., and Ketsdever, A. D. (ed.): Micropropulsion for Small Spacecraft, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Astronautics and Aeronautics.,187 (2000).
- 2) Phipps, C. Luke, J.: Diode laser-driven microthrusters: A new departure for micropropulsion, *AIAA J.*, **40**, 2000, pp.310-318.
- 3) Pakhomov, V. A., Gregory, D. A.: Ablative laser propulsion: An old concept revisited, *AIAA J.*, **38**, 2000, pp.725-727.
- 4) Phipps, C. Luke, R. J., Lippert, T. Hauer, M. Wokaun, A.: Micropropulsion using a laser ablation jet, *A. Journal of Propulsion and Power*, **20**, 2004, pp.1000-1011.
- 5) Horisawa, H., Igari, A., Kawakami, M., Kimura, I.: Discharge characteristics of laser-electric hybrid thrusters, *AIAA Paper*, 2004, AIAA 2004-3937.
- 6) Horisawa, H., Kawakami, M., Kimura, I.: Laser-assisted pulsed plasma thruster for space propulsion applications, *Applied Physics A.*, **81**, 2005, pp.303-310.
- 7) Horisawa, H., Sasaki, K., Igari, A., Kimura, I.: Laser-electric hybrid acceleration system for space propulsion applications, *The Review of Laser Engineering*, **34**, 2006, pp.435-441.
- 8) Ono, T. Uchida, Y., Horisawa, H., Funaki, I.: Measurement of ion acceleration characteristics of a laser-electrostatic hybrid microthruster for space propulsion applications, *Vacuum*, **83**, 2009, pp.213-216.
- 9) 堤井 信力：プラズマ基礎工学，内田老鶴圃，1995，pp173-177.