

静電加速型レーザー・電気複合推進機の開発

○坂井達郎（東海大・院），小野澤和哉，納村聡太（東海大・学）堀澤秀之（東海大・工）

Development of an Electrostatic Acceleration Mode of a Laser Electric Hybrid Propulsion System
Tatsuro Sakai, Kazuya Onozawa, Akihiro Osamura and Hideyuki Horisawa (Tokai University)

Key Words: Microchip laser, Laser ablation, Laser-electric hybrid propulsion, Electrostatic acceleration

Abstract

We have proposed an Laser Electric Hybrid Propulsion System as Electric Propulsion for space craft, and we have studied about a method of electrostatic acceleration of the Laser Ablation Plasma by using accelerating electrode. However it was found that plasma was not effectively accelerated. In this research, we aim for solving the problem by using two approaches, 1) Accelerate both ions and electrons in plasma, 2) Improvement in degree of ionization due to applying magnetic field.

1. はじめに

近年，小型で軽量なナノ衛星やピコ衛星などの超小型人工衛星の研究・開発が盛んに行われているが，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，将来的にはミッションに応じて姿勢・軌道の制御が必要になり得るものと考えられる．このような衛星は質量に大幅な制限を受けるため，小型かつ高性能である必要がある¹⁾．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．

このタイプのレーザー推進機は，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性が容易な推進機として，研究が進められている．^{1) -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することで，推進性能向上の可能性を検討してきた（図1）．この方式には，加速電極の電圧を変化させることにより，静電加速方式と電磁加速方式の二つの加速方式を切り替えて使うことが出来るという特徴がある．

本研究では，静電加速方式にのみ着目し，2枚の加速電極を用いていかなる条件でプラズマが加速されやすいかについて実験的検討を行った．

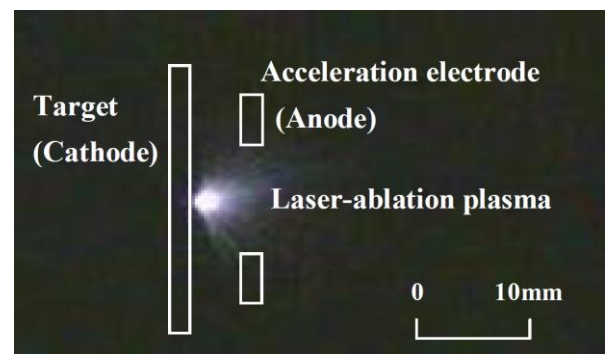


図1 レーザアブレーションプラズマの電氣的加速

2. レーザ・電気複合加速推進機

図1にレーザー誘起プラズマの加速機構の模式図を示す．推進機は板状陰極の銅平板と，銅平板に単円孔を開けた加速電極を兼ねた陽極からなる．陰極・陽極間に配置したキャパシタに電圧を印加後に，レーザーを陰極表面に集光・照射することで，放電室内にプラズマ（推進剤）が供給される．その後の加速方式は印加電圧および放電電流により異なる．

静電加速の場合，レーザー照射直後に表面から電子が放出され，照射点に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．このように初速度を持ったレーザーアブレーションプラズマは，電極がつくる静電場によりさらに加速され

るので、高比推力が期待できる。

一方、電磁加速の場合、レーザ照射に伴って発生するプラズマを介して電極間に大電流が流れる。この時、放電電流 j で誘起される磁場 B と j との相互作用（ローレンツ力 $j \times B$ ）により、レーザアブレーションプラズマはさらに電磁的に加速される。この場合、従来のPPTと異なり、初速度をもつレーザアブレーションプラズマが推進剤として加速領域に供給されるため、推進効率および推進剤の質量損失の改善が期待できる。また、レーザによってスイッチングを行うので、放電を誘起するためのイグナイタは不要である。²⁻³⁾

図2に各種推進システムの比推力と推力密度の関係を示す。図に示すように、レーザ・電気複合推進機は静電加速モードから電磁加速モードへと幅広い作動が可能なので、他の推進システムに比べ、比推力ならびに推力密度をミッションに応じて変化させることができるという特徴を持つ。

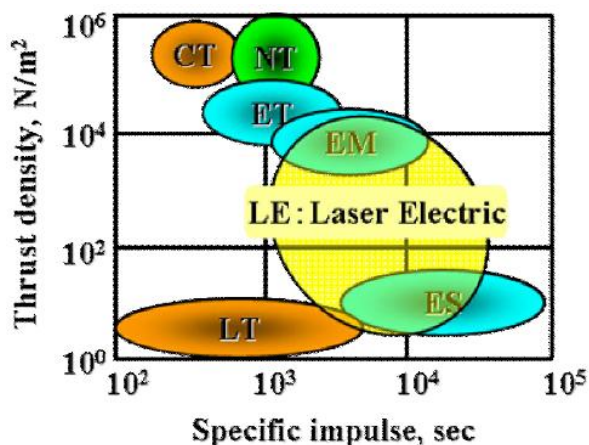


図2 各種推進システムの推力密度と比推力

CT : Chemical Thermal , NT : Nuclear Thermal
 ET : Electrothermal , EM : Electromagnetic
 ES : Electrostatic , LT : Laser Thermal

3. 実験装置及び方法

3-1 マイクロチップレーザ

本研究では、レーザ装置としてマイクロチップレーザを用いた。このレーザは、1994年にMITで発明された固体レーザで、共振器長1~12 mm、断面積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で励起することにより、電気的なスイッチングなしでパルス幅200~300 ps、エネルギー15~250 uJ/pulse程度のビームを1~70 kHzの高繰り返しで発

振可能である。このことから、従来の固体レーザと比べて、推進剤として金属を含む様々な材料を使用することが可能である。本実験ではJDS UNIPHASE社製のマイクロチップレーザを用いた。表1にレーザの仕様を示す。共振器部分はペン先程度の大きさで、直流24Vで作動するため、電源の限られた人工衛星や探査機における利用に適している。

表1 レーザの仕様

平均パルスエネルギー	60μJ
繰り返し周波数	1kHz
パルス幅	250ps
ピークパワー	0.3MW
ビーム径	2mm
電源電圧	DC24V

3-2 超小型レーザ・電気複合推進機

本実験においては、図3のような推進機を試作した。陰極兼推進剤には厚さ $t_1=0.3$ mmの銅平板を用い、加速電極、すなわち陽極には厚さ $t_1=0.3$ mmで直径3 mmの単孔を開けた銅平板を2枚（第1電極、第2電極）用いた。陽極・陰極間と2枚の電極間には樹脂製の $t_2=0.5$ mm絶縁板を同径の穴を開けて挿入した。

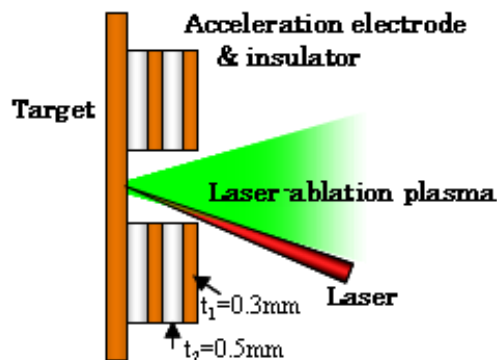


図3 実験に使用した推進機の構造

3-3 ファラデーカップによるイオン電流計測

図4にイオン電流の時間変化計測用実験装置の概略図を示す。図に示したように、本実験はステンレス製真空チャンバ内（長さ1 m×直径0.6 m、真空度 $2.3\sim 3.0 \times 10^{-6}$ Pa）で行った。レーザ光は真空チャンバの石英ガラス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（ $f=1500$ mm）によりパワー密度 0.2×10^{12} W/cm²にて、陰極の銅平板表面に集

光してレーザアブレーションさせた。ターゲット-第1電極間の距離は0.5 mmの場合と1.5 mmの場合についてそれぞれ検討した。また、第1電極と第2電極に印加する電圧は、それぞれが正負の場合について複数検討した。

イオン加速特性は、推進機から排気されるプラズマ中のイオン電流の時間変化を測定することで評価した。イオン電流計測には、3枚のグリッドを備えたファラデーカップ（イオンコレクタ部の口径30 mm）を使用し、固体推進剤ターゲットから7.5 cm, 12.5 cm, ならびに17.5 cm隔てた位置でそれぞれ計測を行った。また、イオン電流の時間変化はデジタルオシロスコープ（Tektronix, TDC3034B, 帯域幅：0~300 MHz）で記録した。なお、ファラデーカップについては、プラズマに面した1枚目のグリッドは接地せず、2枚目のグリッドと3枚目のグリッドに+26 V印加し、コレクタには-27Vを印加した。これにより、1~3枚目のグリッドで高エネルギー電子を遮断し、イオンのみコレクタで捕捉できるように調整した。

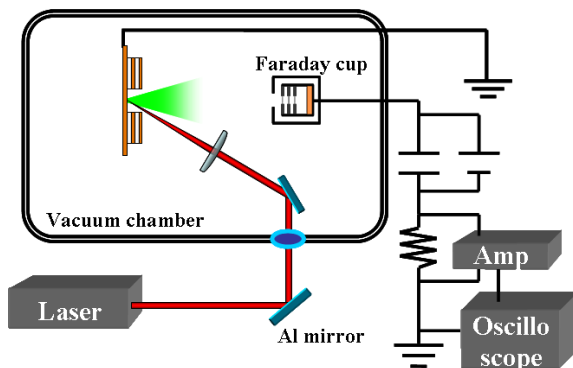


図4 実験装置図

4. 実験結果及び考察

4-1 レーザアブレーションプラズマの電子温度・密度及びデバイ長

推進機からのイオン加速特性の評価に先立ち、シングルプローブを使用し、電氣的に加速する前のレーザアブレーションプラズマの電子温度および密度の時間的变化を測定した。シングルプローブには、直径 0.1 mm×長さ 2.0 mmの円筒形タングステンを用いた。プローブは、X-Y ステージで排出プラズマの中心軸上を移動し、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アブレーションプラズマは、高時間分解観察が必要となる。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。各プローブ電圧におけるプローブ電流の時間変化波形をオシロスコープで計測した。得られた各電圧における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-電流特性が得られる。この V_p-I_p 特性から電子温度、密度、デバイ長を算出した。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、諸量の時間変化をプロットした⁵⁾。

プローブ位置 30 mm で計測した電子温度および電子密度を Fig.6, 7 に示す。図より、この位置における電子温度は1~2eVであることがわかる。一方、電子密度は、ピーク値が約 $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ (1.6μsec) で、時間経過につれて徐々に減少していくことがわかる。

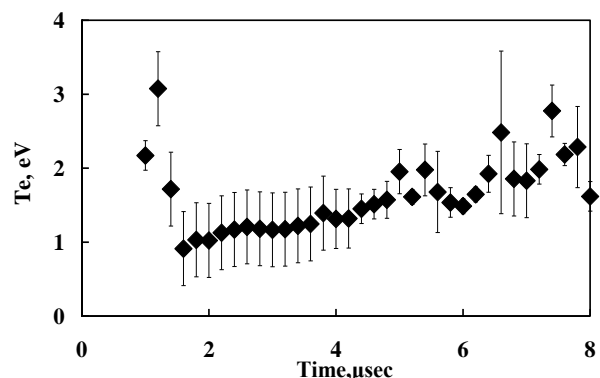


図5 プローブ位置 30 mm での電子温度の時間変化

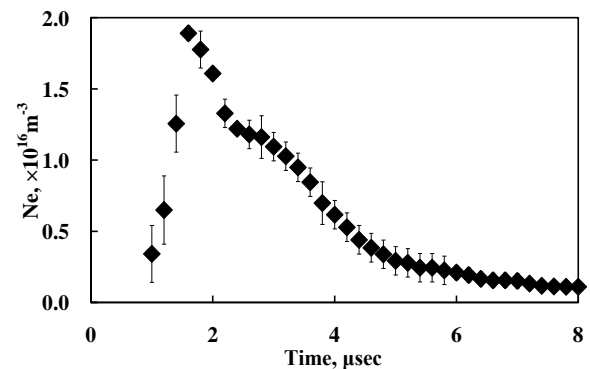


図6 プローブ位置 30 mm での電子密度の時間変化

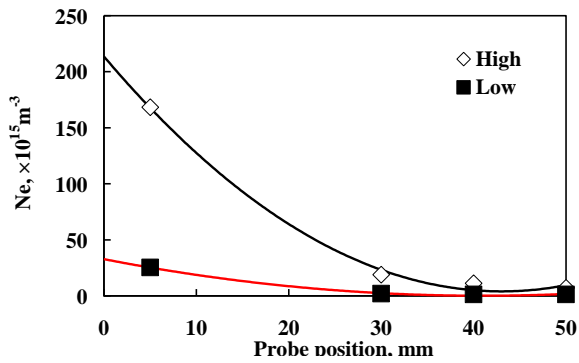


図7 任意のプロープ位置での電子密度

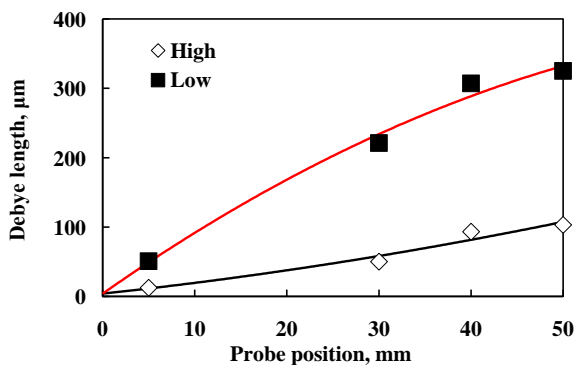


図8 任意のプロープ位置でのデバイ長

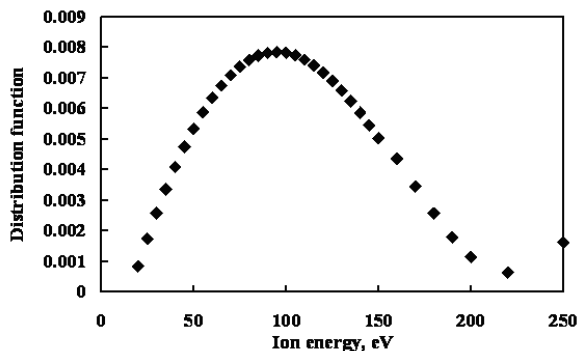


図9 アブレーションプラズマエネルギー分布

このようにして得られた各位置の電子密度とデバイ長を図7, 8に示す。図中の線は各プロットを2次の多項式近似で内挿・外挿したものである。図中のHighは各位置における密度のピーク値および算出したデバイ長で、Lowは密度勾配が変化する点の値である。

4-2 ファラデーカップによるイオンエネルギー計測

ファラデーカップのグリッド印加電圧を変化させ、レーザーアブレーションプラズマのエネルギー分布の計測を行った。図9は印加電圧を変化させた各場合のイオン電流のピーク値の変化量を微分して求めたイオンエネルギー分布である。これより、本研究でのレ

ーザアブレーションプラズマのエネルギーは20~220 eV程度であり、約95 eV付近のイオンが最も多く存在することがわかる。なお、ここではイオンを1価と仮定し、このエネルギーを運動エネルギーに換算すると、個々のイオンは7.8~25.8 km/sec程度の速度を持っており、速度が17 km/secのイオンが最も多く存在することがわかる。

一方、イオン電流の時間変化から、推進剤ターゲットからコレクタまでのイオンの飛行時間と二点間の距離からTOF法によりイオン速度を算出した。この結果、ターゲット-コレクタ間が77 mmで、イオン電流波形のピーク値を与える時間が4.6 μsecであることから、イオンの平均速度は16.7 km/secとなった。この結果とイオンエネルギー計測から得られた平均速度と比較するとほぼ同等といえる。このことから、ここで生成させるレーザーアブレーションプラズマのイオン価数は1であり、また、TOF法から得られるイオン速度は妥当であるといえる。

4.3 2枚電極によるイオン加速特性

本実験では、ターゲット-ファラデーカップ間距離7.5 cm, 12.5 cm, および17.5 cmの3点でイオン電流を測定した。その結果、種々の条件で3点とも同様の傾向を示すことを確認した。ここでは、その代表的な結果について示す。

図10に、第1電極電圧をそれぞれ-10 V, -20 V, ならびに-40 Vと変化させ、第2電極電圧を+20 V(固定)、ターゲット-加速電極間距離0.5 mmの場合についてイオン電流、イオン速度分布を示す。

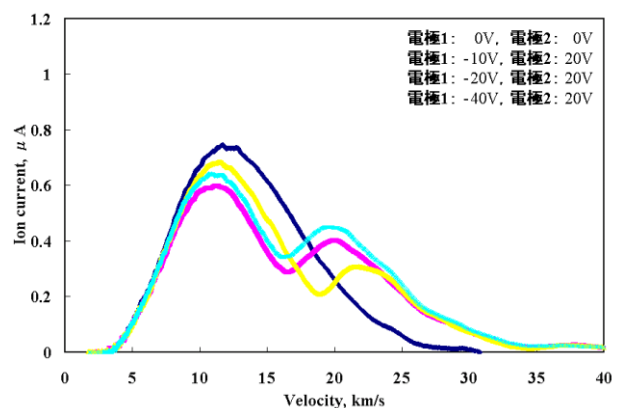


図10 イオン電流と速度分布

図10から、電極間の電位差を増大させるにつれて2つ目のピークが現れ波形全体が右側にシフト、すなわちイオンが加速されていることが確認できる。これらの場合のイオン電流の2つ目のピークを与える速度は、第一電極が-40 Vのとき約23 km/s、-20 Vのとき約20 km/s、-10 Vのとき約19 km/sであり、電極間の電位差が正の勾配で大きい場合ほど、速度が増大しているのがわかる。しかし、イオン電流については、電極間の電位差が小さい場合の方が大きい。この場合、ターゲット-第一電極間の負の電位勾配よりも、第一電極-第二電極間の正の電位勾配の方が-10 Vで3倍、-20 Vで4倍、-40 Vで6倍になっている。したがって、ターゲット-第一電極の負の電位勾配を増大させ、かつ電極間の正の電位勾配を増大するほどイオンが加速されるものの、同時に加速されるイオンの量も減少するといえる。

5. まとめ

レーザー・電気複合型推進機の一つとして、レーザー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場合、どのようなメカニズム・条件で加速するかについて基礎研究を行った。主たる結論として、加速電極がターゲット近傍にあった場合でも、プラズマは加速電極の影響を受け加速・減速する。また、加速電極電圧が正・負どちらの場合でも、完全なデバイ遮蔽は起きず、その影響を受けている可能性がある。

6. 参考文献

- 1) 堀澤秀之：日本航空宇宙学会誌 51 (2003) , pp.191-196
- 2) Phipps, C., and Luke, J., AIAA, J., Vol.40, No.2, 2002, pp310-318
- 3) Gonzales, D., and Baker, R., "AIAA Paper 2001-3789, 2001
- 4) 猪狩晃他, 宇宙輸送シンポジウム, pp.328-338, 2004
- 5) 内田康文他, 宇宙輸送シンポジウム, pp364-367, 2005

- 6) 木野周他, 第50回宇宙科学技術連合講演会, pp1829-1831, 2006
- 7) 小野智久他, 第38回年会講演会, pp144-147, 2007