

小型レーザープラズマ推進機

Small-Sized Laser Plasma Thrusters

堀澤 秀之*

Hideyuki Horisawa

*東海大学工学部航空宇宙学科

Key Words: Laser Plasma Thruster, Micropropulsion, Laser Plasma Acceleration

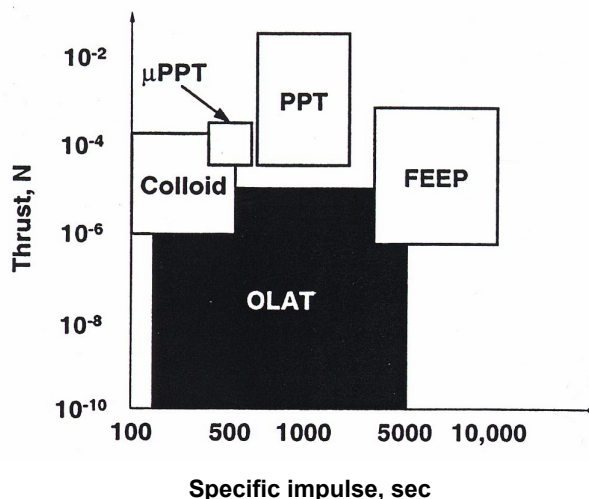
1. はじめに

近年、マイクロ衛星、ナノ衛星、さらにはピコ衛星などの超小型人工衛星が注目を集めている。特に、推進装置など各種要素技術については、精密加工技術の進歩に伴い、各種デバイスの小型化が可能になった背景と、これらのさらなる小型化への挑戦という側面もあいまって、各国で開発が進められている。各種要素の小型化は、打上げ総重量の軽量化、すなわちミッション・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ことのみならず、システム全体を低電力化することも含んでいる^{1,4)}。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。

質量が大幅に制限される超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²⁾。これまで、消費電力が100 W程度以下の超小型推進(micropropulsion)システムについて、イオン推進機⁵⁻⁸⁾、FEFP^{9,10)}、PPT^{11,12)}、レジストジェット¹³⁻¹⁷⁾、アークジェット¹⁸⁻²³⁾など、様々な電気推進装置に関連する研究が各国で進められている。

小型レーザー推進機は、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、種々の基礎研究が進められている²⁴⁻³⁵⁾。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(あるいは衛星ベース)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。MITのGonzales等はこれをOLAT(On-Board Laser Ablation Thruster)と呼び、既存の各種推進機に対して推定推進特性を比較し、第1図のように示している²⁵⁾。図に示すように、その主たる特徴は、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。本稿では、このような特徴を持つ小型レーザー推進機について取り上げ、代表的ないくつかの例について解説する。



第1図 オンボード・レーザーアブレーション推進機 (On-Board Laser Ablation Thruster, OLAT) の推進特性²⁵⁾

2. レーザアブレーションによるインパルス生成²⁴⁾

小型レーザ推進機では、主としてレーザを固体ターゲット（推進剤）表面に照射することでプラズマを生成し（レーザアブレーション）、このときターゲット表面に作用する反力を推力として利用する。ここで生成されるプラズマは、多くの場合、ターゲット表面に比較的垂直にかつ収束して噴出する傾向にある。従って、生成後のプラズマを偏向あるいは加速するための特別な付加機構（例えばノズルや加速電極など）が必要ないことが特徴である。そのため、基本的な装置構成は、レーザ、ターゲット（推進剤）、光学系、および電源からなり、非常に単純である。

真空中でレーザを固体材料表面に照射したときに発生するインパルスについては、各種レーザおよびターゲットについて、これまで数多く調べられている^{24,26,27)}。その結果、照射したレーザにより最大インパルスが得られるフルエンス（エネルギー密度）の最小（最適）値は、プラズマ生成が観測されるフルエンスのしきい値程度（以上）であることが知られている。第2図は、この最適フルエンス Φ とパルス幅 τ の相関関係を、各種レーザ（波長領域：UV（紫外）からIR（赤外）、パルス幅：300 psec~2 msec）を各種材料に照射した場合についてプロットしたものである^{24,26,27)}。図中の塗りつぶした領域は、フルエンスとパルス幅が、 $\Phi = A \tau^B$ ($A = 2.38 \times 10^4$, $B = 0.45$) のプロットで表されることを示している。これらのプロットでは、レーザエネルギーのターゲット材料内部への熱拡散の影響が無視されている。すなわち、熱拡散率を κ とすると、レーザ照射に伴う光軸方向の熱影響層の深さは、 $x_{th} = (\kappa \tau)^{1/2}$ で与えられ、レーザのスポット径を d_s とすると、 $x_{th} / d_s \ll 1$ が仮定されている。第1表に、パルス幅 $\tau = 100 \mu\text{sec}$ の場合の各種材料に対する x_{th} / d_s を示す²⁴⁾。これらの結果から、パルス幅が比較的長いレーザを用いる場合には、推進剤として熱拡散率の小さい材料を用いるのが望ましく、一方、パルス幅が短い場合には、幅広い材料を選択できることがわかる。

パルスエネルギー W のレーザ照射により飛翔体に誘起される運動量カップリング係数 C_m は、質量 m の宇宙機 の速度増分を Δv （あるいは出力 P のCWレーザについては推力 F ）とすると、

$$C_m = m\Delta v/W = F/P \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表される。また、レーザアブレーションで噴出するプラズマの質量を Δm 、平均速度を v_E とすると、噴出プ

ラズマ単位質量当りの投入エネルギー（比エネルギー）は、 $Q^* = W/\Delta m$ で表される。また、

$$m\Delta v = \Delta m v_E \quad \dots \dots \dots (2)$$

とすると、

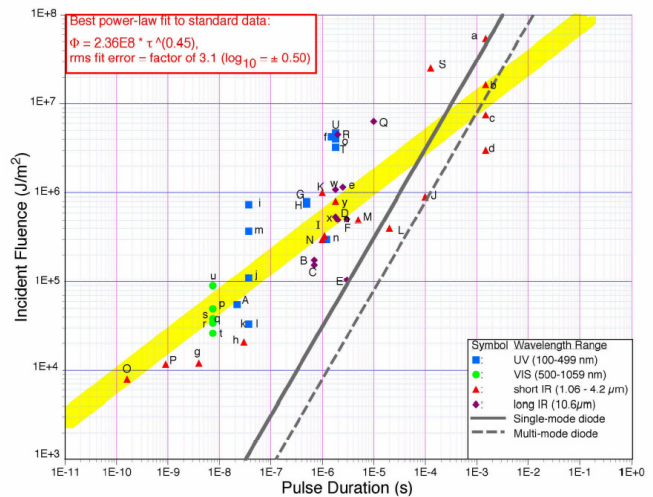
$$C_m Q^* = v_E = g I_{sp} \quad \dots \dots \dots (3)$$

と表される（ g ：重力加速度、 I_{sp} ：比推力）²⁴⁾。

さらに、エネルギー変換効率（ $\eta_{AB} = [\text{噴出プラズマの運動エネルギー}]/[\text{レーザエネルギー}]$ ）は、

$$2\eta_{AB} = \Delta m v_E^2/W = C_m^2 Q^* = g C_m I_{sp} = C_m v_E \quad \dots (4)$$

で与えられる²⁴⁾。 η_{AB} は物理的に $\eta_{AB} \leq 1$ なので、すなわち、高い C_m を得る場合には v_E が小さくなり、逆に、高い v_E を得るときは、 C_m が小さくなることを意味する。これまでの研究で、標準的な材料については、 $C_m = 10 \sim 100 \text{ N/MW}$ 程度であることが報告されている^{24,26,27)}。



第2図 照射レーザの最小フルエンス（各種材料に各種レーザを照射時にプラズマ生成が観測され最大カップリング係数が得られるフルエンスの最小値）とパルス幅との相関関係²⁴⁾

第1表 各種材料に対する照射レーザの熱影響深さ（レーザパルス幅 100μsec, スポット径 $d_s = 5\mu\text{m}$ ）²⁴⁾

Material	x_{th} [μm]	x_{th}/d_s
PMMA	1.1	0.22
Polyvinylchloride	3.1	0.62
Silica	9.2	1.7
Nylon	29	5.6
Carbon phenolic	40	8.0
Tungsten carbide	50	9.9
Aluminum	88	1.7
Copper	110	21
Graphite	130	25

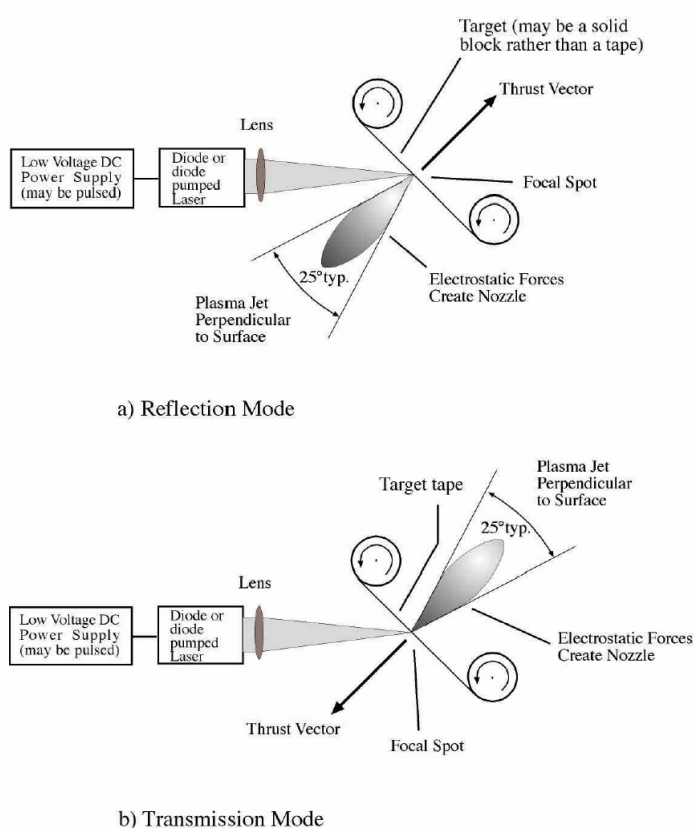
Photonics Associates の Phipps 等は 2W 程度の小型高効率 (約 50%) 半導体レーザによりテープ状の固体推進剤をアブレーションすることで推力を得る推進機を提案し、マイクロ・レーザプラズマ推進機 (Micro Laser Plasma Thruster, μ LPT) と名付けた^{24,26-29)}。第 3 図にその概略を示す。図に示すように、テープ・ターゲットにレーザを照射しプラズマを噴射する方法として、R (反射) モード (Reflective mode) と T (透過) モード (Transmission mode) の 2 種類について検討した。R モードでは、推進剤となるテープ・ターゲット表面に集光レーザを斜めに照射し、表面に垂直な方向にプラズマを噴射することで、その反力を推力として得ている。一方、T モードでは、透明フィルム層と推進剤層の 2 層からなるテープ・ターゲットを用いている。透明フィルムを透過して推進剤にレーザを照射し加熱することで、照射面の裏面に垂直にプラズマを噴射し推力を発生する。R モードに比べ、推進剤が光学系側に飛散しないため汚染が低減できる。

この推進機は、半導体レーザの電気的なスイッチングにより、パルスあるいは連続作動が可能である。また、ターゲット上のパワー密度を任意に調整可能なことから、ミッションの要求に応じた推力、比推力の制御が可能である。推進剤としては 160 種を超える様々な材料が試され、その中でも、高エネルギー材料 (例えば火薬など) の有効性が確認され、高いインパルスを発生可能であることが報告されている²⁴⁾。

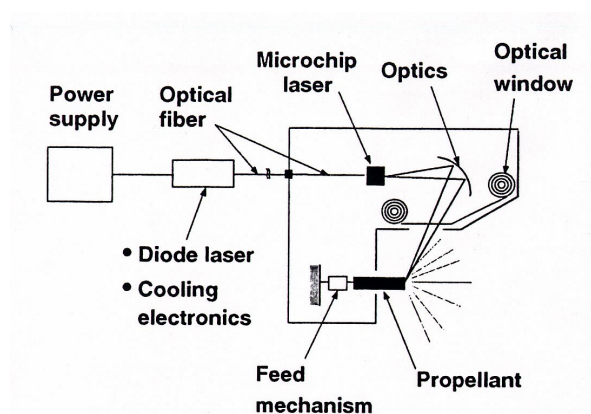
1 W の半導体レーザを用いた場合において、比推力 200~500 sec, 運動量カップリング係数 50~100 N/MW の範囲で制御可能という結果を得ている。また、推進性能はレーザ照射条件にも依存し、R モードの方が、T モードに比べて、比推力が 50 % 高く、かつ、カップリング係数が約 2 倍大きくなる結果を得ている²⁴⁾。

3. 2 マイクロチップレーザ推進機 (Microchip Laser Thruster, MLT)^{25,30)}

MIT の Gonzales 等は、小型で高繰り返しパルスを発生可能なマイクロチップレーザを用いた推進機 (マイクロチップレーザ推進機, Microchip Laser Thruster, MLT) を提案した^{25,30)}。マイクロチップレーザは 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 1~2 mm 角程度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で電気的なスイッチングなしで (受動 Q スイッチにより), パルス幅 200 ~ 300 psec, エネルギー 15 ~ 250 μ J/pulse 程



第3図 マイクロ・レーザプラズマ推進機 (μ LPT) の概略図^{24,26-29)}



第4図 マイクロチップレーザ推進機 (MLT) の概略図^{25,30)}

3. 各種小型レーザ推進機

3. 1 マイクロ・レーザプラズマ推進機 (Micro Laser Plasma Thruster, μ LPT)^{24,26-29)}

度のビームを高繰り返し（1～70 kHz）で発振する．比較的ピークパワーの高いビーム（～サブ・メガワット）の発振が可能である．第4図にMLTの概略図を示す．

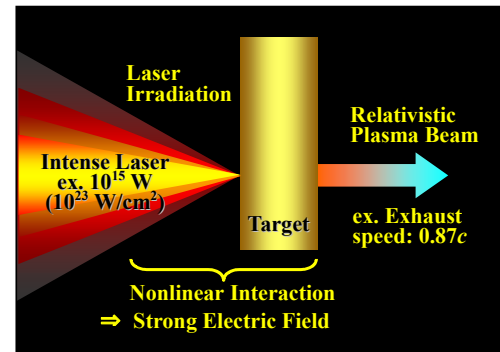
前節に紹介したPhipps等の場合，照射レーザーのパルス幅が比較的長い（数ミリ～サブミリ秒）ことから，ターゲットへの伝熱損失を抑制しアブレーション領域をレーザー照射部に局限するために，ターゲットが低熱拡散率の材料に限られた．また，レーザー照射時のフルエンスを増大させるために，焦点のスポット径をできる限り小さくする必要があった²⁴⁾．これに対して，マイクロチップレーザーのような短パルス・高ピークパワーのレーザーを用いる場合，推進剤として金属なども含む様々な材料が使用可能となる．さらに，高ピークパワー・レーザーの場合，レーザー照射によりアブレーションされるプラズマは，クーロン爆発の寄与により，ター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³¹⁻³⁴⁾．

Gonzales等はレーザー波長 1064 nm，パルスエネルギー 10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ ，繰り返し周波数 10 kHz のマイクロチップレーザーを用いたシステムを試作し（推進システム全質量 455 g，最大入力 6.5 W），アルミターゲットを用いることで，推力範囲 0.5 nN～5 μN ，比推力 4900 sec を達成した^{25,30)}．しかしながら，半導体レーザーのみを用いるシステムに比べてレーザーのエネルギー変換効率が 1 桁低いと見られ，投入電力に対するレーザー平均出力が 1 桁小さいことが欠点とされている．

4. レーザ加速プラズマ推進機

東海大学の堀澤，ミシガン大学の Kammash 等は，近年の進歩が著しい小型レーザー粒子加速器を推進機に

応用したレーザー加速プラズマ推進機を提案した³²⁻³⁵⁾．高強度レーザーを用いた各種小型粒子加速器は，近年のレーザーの高出力化に伴い，著しく進歩している^{32-34,36-44)}．中でも第5図に示すような高強度レーザーを厚さ 100 μm 程度以下のフィルム状ターゲット（Mylar フィルム，Al，Cu，Ag フォイルなど）に照射する方法は，レーザー・固体の非線型相互作用により，裏面から高速イオンビームを同一方向にしかも高効率で生成可能なことが最近になって確認され，その加速システムの単純さおよび加速距離の短さ（＜ターゲット厚）などから多くの注目を集めている．



第5図 高強度レーザーと固体ターゲットの非線型相互作用による電子・イオンの加速過程．

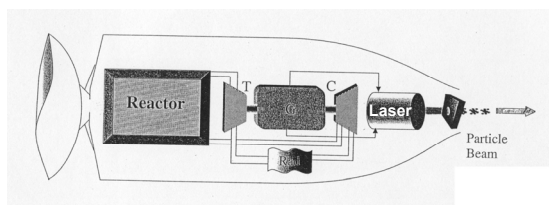
特に，核融合点火源への利用に向けた基礎研究が進められている³⁷⁻⁴⁴⁾．これらの各国の開発状況を第2表に示す．表には，生成されたイオン（主としてプロトン）のエネルギーから見積った速度 u_{ion}/c (c は光速) および比推力 I_{sp} を追加してある³²⁻³⁴⁾．これらの結果から，イオンの速度が光速に近づくにつれて，比推力が著し

第2表 各国における高強度レーザーを用いたプラズマ加速器の開発状況 (λ_L : レーザ波長, E_L : パルスエネルギー, τ_L : パルス幅, P_L : レーザピークパワー, I_L : レーザ強度, E_{ion} : 加速イオンエネルギー, N_{ion} : 加速イオン数, u_{ion} : 加速イオン速度, c : 光速, I_{sp} : 比推力)

Laboratory	λ_L [μm]	E_L [J]	τ_L [psec]	P_L [W]	I_L [W/cm^2]	Ions (Target)	E_{ion} [MeV]	N_{ion} /pulse	E_{ion}/E_L	$(u_{\text{ion}}/c)^c$	I_{sp}^c [Msec]
RAL, ³⁷⁾ U.K.	1.053	30	1.8～4	—	2×10^{18}	Proton (Mylar disk)	4.2 (1.3) ^b	—	0.1	0.094	2.899
RAL, ³⁹⁾ U.K.	1.053	30	～1	—	10^{19}	Proton (CH disk)	12 (1～)	—	—	0.158	4.910
RAL, ⁴²⁾ U.K.	1.053	50	0.9～1.2	—	5×10^{19}	Proton (Al foil)	18 (2～)	10^{12}	(0.06) ^b	0.193	6.022
LLNL, ⁴⁰⁾ USA	1.053	<1k	0.45	～ 10^{15}	6×10^{20}	Proton (Metal foil)	50	—	—	0.317	10.12
LLNL, ⁴³⁾ USA	1.000	—	0.5, 5	～ 10^{15}	3×10^{20}	Proton (Plastic CH)	55 (10～)	3×10^{13}	0.06	0.327	10.63
LLNL, ⁴⁴⁾ USA	1.000	—	0.5	～ 10^{15}	3×10^{20}	Proton (CH polymer)	58 (10～)	2×10^{13}	0.12	0.336	10.92
LLNL, ^{38)a} USA	0.400	—	0.01～0.2	～ 10^{15}	$10^{18} \sim 10^{22}$	Proton (Al, CH foil)	29	3×10^{13}	0.2	0.243	7.667
Osaka U., ^{41)a} JPN	1.000	—	0.018	～ 10^{15}	1.6×10^{22}	Proton (Plasma slab)	～1000	—	—	0.875	55.29

^a results from PIC simulation, ^b average value, ^c estimated value

く増大することがわかる³²⁻³⁴⁾。これまでの実験結果から得られた最大イオンエネルギーは 58 MeV で、これは速度にして光速の約 33 % に相当し、比推力に換算すると約 10 Msec となる³²⁻³⁴⁾。また、理論的には既存のレーザー装置で光速の約 87 % の相対論的イオンビームが生成可能であることが示唆されている⁴¹⁾。



第 6 図 レーザ加速プラズマ推進機 (Laser-accelerated plasma propulsion system, LAPPS) を搭載した恒星間飛行ロケット (原子力発電 (Reactor: 原子炉, T: タービン, G: 発電機) でレーザーを駆動)³⁵⁾

ミシガン大学の Kammash は、同様の推進システムを搭載したロケット (第 6 図) を想定し (電源 1 MW, 乾燥質量 5,000 kg, 比推力 3×10^6 sec, 推力 0.03 N), 恒星間飛行の一例として, Oort cloud (10,000 AU) へのフライバイ・ミッションについて考察した³⁵⁾。その結果, 既存の要素技術では, 700 年もかかり, 何世代にもわたる長期観測が必要となるが, 推力を 25 N 程度に増大させる技術が確立されれば, 26 年という一観測者が観測可能な時間内でミッションを実現できることを示した³⁵⁾。

5. まとめ

小型レーザー推進機は, レーザ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, 特に最近になって注目が高まり, 各国で種々の基礎研究が進められるようになった。しかしながら, レーザと固体材料との相互作用については, 特に, 光学物性あるいは高エネルギー物理の側面から様々な研究が行われているが, 未解明の点が数多い。今後のレーザー推進機の実現は, 現在まで著しく発展してきたレーザー装置および各種要素技術の進歩に依存することはいうまでもないが, これに加えて, レーザ・固体相互作用という物理現象そのもののさらなる解明という点にも強く依存している。

参考文献

- 1) Myers, R.M., Oleson, S.R., Curren, F.M., and Schneider, S.J., "Small Satellite Propulsion Options," AIAA Paper 94-2997, June 1994.
- 2) Mueller, J., "Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of Existing Hardware and Emerging Technologies," AIAA Paper 97-3058, July 1997.
- 3) Leifer, S., "Overview of NASA's Advanced Propulsion Concepts Activities," AIAA Paper 98-3183, July 1998.
- 4) Micci, M. M., and Ketsdever, A. D. (ed.), *Micropropulsion for Small Spacecraft (Prog. Astronautics and Aeronautics 187)*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- 5) Young, M., Muntz, E.P., and Ketsdever, A.D., "Investigation of a Candidate Non-magnetic Ion Micro-thruster for Small Spacecraft Applications," AIAA Paper 98-3917, July 1998.
- 6) Mueller, J., Pyle, D., Chakraborty, I., Ruiz, R., Tang, W., and Lawton, R., "Microfabricated Ion Accelerator Grid Design Issues: Electric Breakdown Characteristics of Silicon Dioxide Insulator Material," AIAA Paper 98-3923, July 1998.
- 7) Yashko, G., Giffin, G., and Hastings, D., "Design Considerations for Ion Microthrusters", IEPC 97-072, Aug. 1997.
- 8) Gorshkov, O.A., "Low-power Hall Type and Ion Electric Propulsion for the Small Sized Spacecraft", AIAA Paper 98-3929, July 1998.
- 9) Marcuccio, S., Genovese, A., and Andrenucci, M., "Experimental Performance of Field Emission Microthrusters", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14, No.5, 1998, pp.774-781.
- 10) Fehringer, M., Rudenauer, F., and Steiger, W., "Space-proven Indium Metal Field Ion Emitters for Microthruster Applications", AIAA Paper 97-3057, July 1997.
- 11) Guman, W.J., and Peko, P.E., "Solid-Propellant Pulsed Plasma Microthruster Studies", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.5, No.6, 1968, pp.732-733.
- 12) Turchi, P.J., "An Electric Propulsion Development Strategy Based on the Pulsed Plasma Microthruster", AIAA Paper 82-1901, Nov. 1982.
- 13) Mueller, J., Tang, W.C., Wallace, A.P., Li, W., Bame, D., Chakraborty, I., and Lawton, R., "Design, Analysis, and Fabrication of a Vaporizing Liquid Micro-thruster", AIAA Paper 97-3054, July 1997.
- 14) Mueller, J., Chakraborty, I., Bame, D., Tang, W.C., Lawton, R., and Wallace, A.P., "Proof-of-Concept Demonstration of a Vaporizing Liquid Micro-thruster", AIAA Paper 98-3924, July 1998.

- 15) Jankovsky, R., Sankovic, J., and Oleson, S., "Performance of a FAKEL K10K Resistojet", AIAA Paper 97-3059, July 1997.
- 16) Ketsdever, A., Wadsworth, D.C., Vargo, S., and Muntz, E.P., "The Free Molecule Micro-resistojet: an Interesting Alternative to Nozzle Expansion", AIAA Paper 98-3918, July 1998.
- 17) Lawrence, T.J., Sweeting, M., Paul, M., Sellers, J.J., LeDuc, J.R., Malak, J.B., Spanjers, G.G., Spores, R.A., and Schilling, J., "Performance Testing of a Resistojet Thruster for Small Satellite Applications", AIAA Paper 98-3933, July 1998.
- 18) Nordling, D., Souliez, F., and Micci, M.M., "Low-power Microwave arcjet testing", AIAA Paper 98-3499, July 1998.
- 19) Willmes, G.F., and Burton, R.L., "Thrust Performance of a Very Low Power Pulsed Arcjet", AIAA Paper 94-3125, June 1994.
- 20) Willmes, G.F., and Burton, R.L., "Performance Measurements and Energy Losses in a 100 Watt Pulsed Arcjet", AIAA Paper 96-2966, July 1996.
- 21) Horisawa, H., and Kimura, I., "Influence of Constrictor Size on Thrust Performance of a Very Low Power Arcjet", AIAA Paper 98-3633, July 1998.
- 22) Curran, F.M., and Sarmiento, C.J., "Low Power Arcjet Performance Characterization", AIAA Paper 90-2578, July 1990.
- 23) Horisawa, H., and Kimura, I., "Studies of Very Low Power Arcjets," Chap.6 in *Micropropulsion for Small Spacecraft* (Micci, M.M., and Ketsdever, A.D. eds.), *Prog. in Astronautics and Aeronautics 187*, pp.185-197, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- 24) Phipps, C., and Luke, J., "Diode Laser-Driven Microthrusters: A New Departure for Micropropulsion", *AIAA Journal*, Vol.40, No.2, 2002, pp.310-318.
- 25) Gonzales, D., and Baker, R., "Microchip Laser Propulsion for Small Satellites," AIAA Paper 2001-3789, 2001.
- 26) Phipps, C., Turner, T. P., Harrison, R. F., York, G. W., Osborne, W. Z., Anderson, G. K., Corlis, X. F., Haynes, L. C., Steele, H. S., and Spicochi, K. C., "Impulse Coupling to Targets in Vacuum by KrF, HF, and CO₂ Single-Pulse Lasers", *Journal of Applied Physics*, Vol.64, No.3, 1988, pp.1083-1096.
- 27) Phipps, C., Luke, J., and Marquis, J., "Diode Laser-Driven Microthrusters - a New Departure in High Specific Impulse, Long Life Engines", AIAA Paper 2000-3477, 2000.
- 28) Phipps, C., Luke, J., McDuff, G., and Lippert, T., "Laser Ablation Powered Mini-Thruster," Proceedings of SPIE Vol.4760, pp.833 – 842, 2002.
- 29) Luke, J., Phipps, C., and McDuff, G., "Laser Plasma Thruster Continuous Thrust Experiment," Proceedings of SPIE Vol.4760, pp.843 – 851, 2002.
- 30) Gonzales, D., and Baker, R., "Micropropulsion using a Nd:YAG Microchip Laser," Proceedings of SPIE Vol.4760, pp.752 – 765, 2002.
- 31) Pakhomov, A.V., Tompson, M.S., Gregory, D.A., and Swift Jr., Wesley, "Specific Impulse Study of Ablative Laser Propulsion," AIAA Paper 2001-3663, 2001.
- 32) Horisawa, H., and Kimura, I., "Characterization of Novel Laser Particle Accelerators for Space Propulsion," AIAA Paper 2000-3487, 2000.
- 33) Horisawa, H., and Kimura, I., "Relativistic Plasma Acceleration by Intense Laser Pulses for Space Propulsion," IEPC-01-206, 2001.
- 34) Horisawa, H., and Kimura, I., "Fundamental Study on Laser Plasma Accelerator for Propulsion Applications," *Vacuum*, Vol.65, No.3-4, pp.389-396, 2002.
- 35) Kammash, T., "Advanced Space Propulsion with Ultra-Fast Lasers," *Proc. 1st International Symposium of Beamed Energy Propulsion* (to be published).
- 36) Esarey, E., Sprangle, P., Krall, J., and Ting, A., "Overview of Plasma-Based Accelerator Concepts," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.24, No.2, 1996, pp.252 – 288.
- 37) Fewes, A.P., Norreys, P.A., Beg, F.N., Bell, A.R., Dangor, A.E., Danson, C.N., Lee, P., and Rose, S.J., "Plasma Ion Emission from High Intensity Picosecond Laser Pulse Interactions with Solid Targets," *Physical Review Letters* Vol.73, No.13, 1994, pp.1801-1804.
- 38) Lawson, W.S., Rambo, P.W., and Larson, D.J., "One Dimensional Simulations of Ultrashort Intense Laser Pulses on Solid-Density Targets," *Physics of Plasmas*, Vol.4, No.3, 1997, pp.788-795.
- 39) Beg, F.N., Bell, A.R., Dangor, A.E., Danson, C.N., Fewes, A.P., Glinsky, M.E., Hammel, B.A., Lee, P., Norreys, P.A., and Taterakis, "A Study of Picosecond Laser-Solid Interactions up to 1019 W cm⁻²," *Physics of Plasmas*, Vol.4, No.2, 1997, pp.447-457.
- 40) Roth, M., Cowan, T.E., Hunt, A.W., Johnson, J., Brown, C., Fountain, W., Hatchett, S., Henry, E.A., Key, M.H., Kuehl, T., Parnell, T., Pennington, D.M., Perry, M.D., Sangster, T.C., Christl, M., Singh, M., Snavely, R., Stoyer, M., Takahashi, Y., and Wilks, S.C., "High-Energy Electron, Positron, Ion and Nuclear Spectroscopy in Ultra-Intense Laser-Solid Experiments on the Petawatt," *First International Conference on Inertial Fusion Science and Applications*, 1999.
- 41) Sentoku, Y., Liseikina, T.V., Esirkepov, T. Zh., Califano,

F., Naumova, N.M., Ueshima, Y., Vshikov, V.A., Kato, Y., Mima, K., Nishihara, K., Pegoraro, F., and Bulanov, S.V., "High Density Collimated Beams of Relativistic Ions Produced by Petawatt Laser Pulses in Plasmas," *Physical Review E* Vol.62, No.5, 2000, pp.7271 – 7281.

42) Clark, E.L., Krushelnick, K., Davis, J.R., Zepf, M., Tatarakis, M., Beg, F.N., Machacek, A., Norreys, P.A., Santala, M.I.K., Watts, I., and Dangor, A.E., "Measurements of Energetic Proton Transport through Magnetized Plasma from Intense Laser Interactions with Solids," *Physical Review Letters*, Vol.84, No.4, 2000, pp.670-673.

43) Hatchett, S.P., Brown, C.G., Cowan, T.E., Henry, E.A., Johnson, J.S., Key, M.H., Koch, J.A., Langdon, A.B., Lasinski, B.F., Lee, R.W., Mackinnon, A.J., Pennington, D.M., Perry, M.D., Phillips, T.W., Roth, M., Stangster, C., Singh, M.S., Snavely, R.A., Stoyer, M.A., Wilks, S.C., and Yasuike, K., "Electron, Photon, and Ion Beams from the Relativistic Interaction of Petawatt Laser Pulses with Solid Targets," *Physics of Plasmas*, Vol.7, No.5, 2000, pp.2076-2082.

44) Snavely, R.A., Key, M.H., Hatchett, S.P., Cowan, T.E., Roth, M., Phillips, T.W., Stoyer, M.A., Henry, E.A., Sangster, T.C., Singh, M.S., Wilks, S.C., MacKinnon, A., Offenberger, A., Pennington, D.M., Yasuike, K., Langdon, A.B., Lasinski, B.F., Johnson, J., Perry, M.D., and Campbell, E.M., "Intense High-Energy Proton Beams from Petawatt-Laser Irradiation of Solids," *Physical Review Letters*, Vol.85, No.14, 2000, pp.2945-2948.