

# Nd:YAG レーザ第 5 高調波による DC マイクロアークジェット・ノズルの微細加工

堀澤 秀之\*

## Microfabrication of DC Microarcjet Nozzles by Fifth-Harmonic Generation of Nd:YAG Lasers

by

Hideyuki Horisawa\*

### Abstract

The microfabrication of a microarcjet by the fifth-harmonic generation of Nd:YAG pulses (wavelength 213 nm) was performed and its plasma acceleration characteristics were investigated. The microarcjet, with a rectangular exit of 0.5 mm in height, was machined in a 1.0-mm-thick quartz plate. For the electrodes, Au films were coated on a divergent part of the nozzle for the anode and on an inner wall surface for the cathode. In addition, the microfabrication of 3 x 3 rectangular micro nozzle arrays, each with an exit height of 0.5 mm, using an ultraviolet laser was conducted. Relatively fine structures and smooth surfaces were obtained with a surface roughness of about 200 nm.

**Keywords:** Laser machining, Microfabrication, Surface machining, Fifth-harmonic generation of Nd:YAG lasers, Microthruster, Microarcjet.

### 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マイクロチャンネル内部流という新しい物理現象に対する興味という側面もあいまって、各国で開発が進められている。<sup>1-4</sup> 筆者らは、これまで投入電力が 10 W 程度の微小電力アークジェットについて、その放電特性<sup>5</sup>、プラズマ加熱特性<sup>6-7</sup>、ならびにこれらと推進性能の相互関係について検討してきた。<sup>8</sup> 微小電流領域で安定作動可能な高性能アークジェット推進機が実現できれば、その構造上小型・軽量化が容易であることから、マイクロ衛星用推進装置として適していると考えられる。さらに、Nd:YAG レーザの第 5 高調波を用いてマイクロアークジェットノズルを微細加工し、投入電力 5 W 程度の直流放電で作動可能なマイクロアークジェット推進機を試作した。<sup>9</sup> さらに、その基本的な推進特性の評価を行った。その結果、この種のマイクロノズル流の場合には、ノズル半頂角が比較的大きい場合の方が、推進性能の向上に対して有利であること、ならびに推進性能がノズル形状のみならずノズル出口部の背圧に大きく影響されることを確認した。背圧が低い場合、この種の微小ノズル流では、ノズル長が短いため過度の不足膨張流れとなり、噴流の径方向成分が増大し、逆に推力に寄与する軸方向成分が減少する。

\* 工学部航空宇宙学科助教

そこで、これを緩和し推進性能の向上を図るために、マイクロノズルを複数個アレイ状に配置したアレイノズルについて検討した。本研究では、Nd:YAG レーザ第 5 高調波を用いたマイクロアレイノズルの試作を行い、ノズル加工特性の評価を行った。

### 2. 実験装置および方法

一般にアークジェットのノズルにはタングステンなどの高融点材料が用いられるが、これらの材料は機械的特性が高いことから通常の機械加工が困難であり、3 次元形状構築の自由度には制限が加わり、かつ、精密加工を施す場合、長時間を要する。これに対して短パルスレーザを用いる場合、この種の材料に対しても比較的容易に微細加工を施すことが可能である。そこで我々は、マイクロノズルの試作において、短パルスレーザを採用した。

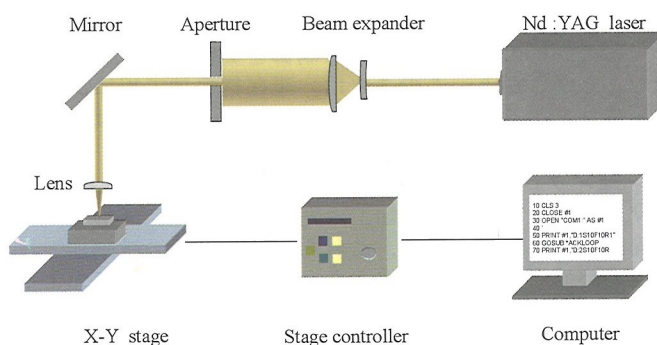


Fig. 1 Short-pulse ultra-violet laser machining system.

特に、レーザー照射部における溶融・ひび割れなどの影響を局限し、精密な加工を実現するために、紫外レーザーを使用した。レーザー発振器には、Q-switch 駆動 Nd:YAG レーザ (NEWWAVE RESEARCH 社製 Tempest-10) の第5高調波 (Fifth-HG, 波長 213nm, パルス幅 5nsec, パルス繰返し周波数 10Hz) を用いた。本レーザーシステムは紫外光発生用に複数の非線形光学結晶を備えており、すなわち第2高調波 (SHG) 用に KTP, 第3高調波 (THG) 用に BBO, 第5高調波 (Fifth-HG) 用に BBO を使用している。ノズル材料には、耐熱、絶縁性に富み、かつ低熱膨張率という点で有利な石英ガラスを用いた。加工システムを Fig.1 に示す。レーザー光は試料に対して集光レンズ ( $f=40\text{mm}$ ) で集光して大気中で照射した。試料は X-Y ステージ上に固定し、あらかじめプログラム化した目的形状にならって移動させた。この方法により試料面上でレーザー光を相対的にスキャンさせ、レーザー照射回数を制御することで、3次元構造の微細加工を実現可能とした。なお、ステージの最小送り速度は  $0.2\mu\text{m}/\text{sec}$  で X-Y 方向の最大移動距離はそれぞれ  $100\text{mm}$  である。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 Nd:YAG レーザ第5高調波の表面加工特性

Fig.2 に、紫外波長の各種高調波レーザーを照射した場合のレーザーフルエンスに対するパルス当りの除去深さの関係を示す。なお、この図の縦軸は、各レーザー照射条件においてレーザー顕微鏡で測定した除去深さを照射パルス数で除すことで算出した。これらの結果は、各レーザー波長の表面除去特性を示している。すなわち、各波長のレーザーについて、照射点で表面除去が起こり始めるフルエンスの閾値の下限値とそのときの1パルスあたりの除去割合を示している。各波長においてこの閾値を超えるフルエンス (例えば  $60 \sim 100 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) のレーザーを照射すると、照射点におけるひび割れや溶融などの顕著な熱影響が現れ始める。この図より、各波長において、フルエンスおよび除去割合の最小値が存在することがわかる。また、これらの両方の値はレーザー波長が短くなるにつれて減少することが認められた。これは、短波長のレーザーほど表面における吸収率が高く、より表層のみをアブレーションする特性を持つことによる。また、第5高調波の場合において、照射部周辺に溶融物や再付着物などがほとんど認められず、比較的清浄な表面除去加工が可能であることがわかる。これはこの場合に、波長が短いことで、1光子当たりのエネルギーが高く、表面の構成原子の結合を2光子程度で分解することが可能で、このため、表層のみをアブレーション可能なことによる。

このように、短波長レーザーを用いる場合、レーザー照射に伴う熱影響を低減できることのみならず、レーザーによる光軸方向への除去量の精密な制御を実現することが可能であることがわかる。このことは、現在材料加工用に広く利用されている赤外波長のレーザーを用いる場合では不可能であった。

#### 3.2 マイクロノズルの微細加工

マイクロノズルの形状加工に先立ち、穴加工、溝加工、表面除去加工などを行い、これらの基本形状の微細加工特性の評価を行った。すなわち、各場合の形状精度および熱影響などについて比較・評価を行った。その結果、いずれの場合においても熱影響を局限した良好な加工形状が得られることが確認された。これらを応用し、円筒形状や直方体、四角錐などの基本形状の精密加工も試み

た。これらの一例を Fig.3 に示す。図に示すように、レーザー照射回数・走査速度を任意に制御することで、様々な形状に対して、レーザー光の径方向のみならず深さ方向の除去量も精密に制御可能なことが確認された。なお、同図(b)における表面の除去レートは約  $100 \text{ nm}/\text{pulse}$  で、底面の表面粗さは約  $200 \text{ nm}$  であった。Fig.4 には試作した種々のマイクロノズルの側面写真を示す。同図(a)~(c)に示すように、この方法により、様々な形状・寸法のマイクロノズルを形成することが可能となった。(c)のノズルは全長  $1 \text{ mm}$  の矩形型で、スロート角および長さが  $100\mu\text{m}$ 、ノズル出口角は  $500 \mu\text{m}$  とした。Fig.5 (a), (b)には、この形状のノズルを一つだけ形成した場合;(a)単一ノズル、ならびに3個×3個=9個のノズルをアレイ状に形成した場合;(b)アレイノズル、の SEM 画像を示す。これらの加工時の平均レーザーフルエンスは  $5.6 \text{ J}/\text{cm}^2$  で、試料表面におけるレーザービーム径は  $40 \mu\text{m}$  とした。また、レーザー集光点は試料表面から  $10 \mu\text{m}$  下の位置に設定し、X-Y ステージの移動速度は  $100 \mu\text{m}/\text{sec}$  とした。図に示すように、熱影響によるひび割れや角部の丸みなどない良好なノズル形状が形成されているのがわかる。

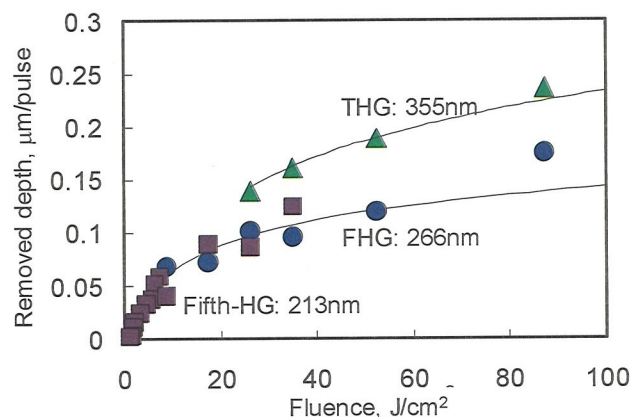
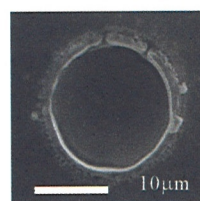
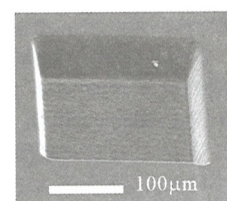


Fig.2 Relations of laser fluence and removed depth for various wavelength lasers ( where, THG : Third harmonic generation, wavelength 355 nm, FHG : Fourth harmonic generation, 266 nm, Fifth-HG : Fifth harmonic generation, 213 nm)



(a) Cylindrical cavity



(b) Rectangular cavity

Fig.3 Examples of SEM images of various structures.

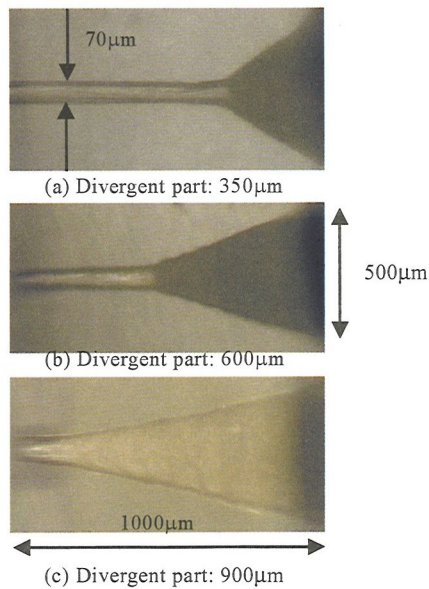
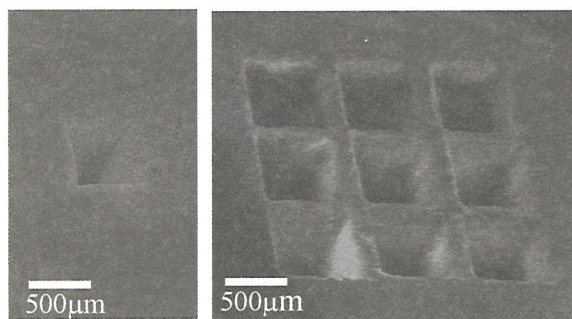


Fig. 4 Examples of various micro-nozzles.



(a) micro-single nozzle (b) Micro-nozzle array

Fig. 5 SEM images of micro-single nozzle and micro-nozzle array.

#### 4. まとめ

本研究では、Nd:YAG レーザ第5高調波(波長 213 nm)を用いて、石英ガラス試料の微細加工特性を評価・検討した。その結果、第5高調波を用いた場合、他の波長(基本波から第4高調波)に比べて、径方向のみならず深さ方向にも熱影響を局限した良好な表面加工が可能であることが確認された。また、この加工システムを利用して各種マイクロシングルノズルおよびマイクロアレイノズルを微細加工し、良好なノズル構造が構築可能であることが確認された。今後は、これらのノズルを用いた推進性能評価実験を行い、さらに高い性能を示すノズル形状の最適化およびマイクロノズルの更なる小型化を予定している。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、工学部研究教育補助金の交付を受けました。ご援助に対してここに深謝致します。

#### 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. Micci, M. M., and Ketsdever, A.D. eds.: Micropropulsion for Small Spacecraft, Progress in Astronautics and Aeronautics Vol.187, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
4. Martinez-Sanchez, M., and Pollard, J.E., "Spacecraft Electric Propulsion-An Overview", Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.5, 1998, pp.688-699.
5. Horisawa, H., and Kimura, I., "Influence of Constrictor Size on Thrust Performance of a Very Low Power Arcjet," AIAA Paper 98-3633, July 1998.
6. Horisawa, H., and Kimura, I., "Optimization of Arc Constrictor Sizes in Low Power Arcjet Thrusters," AIAA Paper 97-3202, July 1997.
7. 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.), Progress in Astronautics and Aeronautics Vol.187, pp.185-197, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
8. Horisawa, H., Ashiya, H. and Kimura, I.: Discharge Characteristics of a Very Low-Power Arcjet, IEPC 03-0078, 2003.
9. 堀澤秀之, 芦谷穂高, 木村逸郎: 微小電力アークジェット推進機, 日本航空宇宙学会誌 第52巻 第610号, 2004