

# 3J03 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機の 作動性能評価

○小林 直人 (東海大・院)、常松 春霞 (東海大・学)、浅沼 和貴 (東海大・院)  
堀澤 秀之 (東海大・工)、船木 一幸 (JAXA/ISAS)

Thrust Performance of Micro Multi-Plasmajet-Array Thruster

Naoto Kobayashi, Haruka Tunematu, Asanuma Kazuki and Hideyuki Horisawa (Tokai University),  
Ikkoh Funaki(JAXA/ISAS)

**Keywords:** Micro-plasmajet Thruster, Micro-Multi-Nozzle-Array, Micro-Fabrication

## Abstract:

Observation of the micro-nozzle discharges was conducted, and a new thruster with extended nozzle structure for which each electrode element was electrically isolated from nearby elements was developed. The typical values of the thrust, specific impulse and averaged per nozzle element of the 6x6 micro-plasmajet array thruster operated at 15 W with 10.4 mg/sec of propellant mass flow per nozzle element were 9.0 mN, 88 sec, respectively.

## 1. はじめに

筆者らは、これまで投入電力が 5 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>1)</sup>、プラズマ加熱特性<sup>2-3)</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>4)</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、構造が簡単で小型・軽量化が容易であることから、小型衛星用推進装置として適していると考えられる。これまでの研究では、投入電力 5 W 程度で作動可能なマイクロアークジェット推進機を試作し、作動試験を行った<sup>5)</sup>。その結果、このようなマイクロノズル流は、ノズル末広部が短いため過度の不足膨張流れとなり、推進性能が背圧に大きく影響されることが確認された。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マイクロ・プラズマジェットアレイ推進機 (3×3 アレイ) について検討し、その有効性を

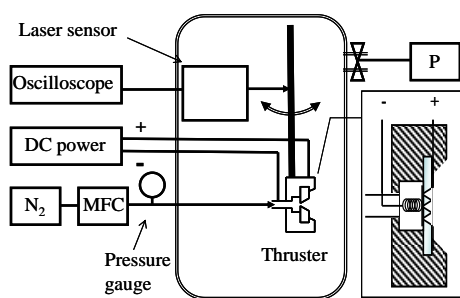
示した<sup>6)</sup>。アレイ推進機の陰極には、金属蒸着電極、フィラメント状電極および針状電極などを試してきた。蒸着電極は耐久性に問題があった。フィラメント状電極は全体が赤熱するため、推進機ヘッドの耐熱性および熱損失が課題となった。一方、針状電極ではガスの加熱が各陰極の先端部に局在させることが可能となったが、放電電流が一部の電極に集中する傾向が確認された。

そこで本研究では、各電極 (針状陰極) を電氣的に孤立化させた新型のマイクロ・マルチ・プラズマジェットアレイ推進機 (6×6 アレイ) を試作した。すなわち、36 個の各陰極に電氣的に独立した抵抗を取り付け、各電極の放電電流を制御し、アレイ全体の放電を均一化させることを図った。試作した新型アレイ推進機の実験的評価を行い、放電特性ならびに推進特性について実験的に評価した。

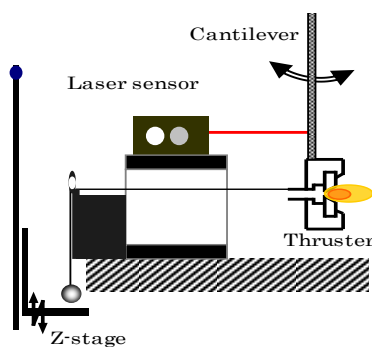
## 2. 実験装置および方法

### 2.1 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機の推力測定方法

本研究では、マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機の放電作動時の推進性能を評価した。Fig.1(a)に実験装置構成図を示す。真空チャンバー内の圧力は4 Paとし、推進剤ガスには窒素ガスを用いた。各条件における推力は、光楯子式レーザ変位センサを備えた石英ガラス製カンチレバー型の推力測定装置 (Fig.1(b)) を用いて真空中で測定した。



(a) Experimental setup.



(b) Cantilever-type thrust stand.

Fig.1 Schematics of experimental setups.

### 2.2 各電極（針状陰極）の孤立化

Fig.2に本研究で使用した各電極（針状陰極）を孤立化させた6×6アレイ推進機概念図を示す。本体はアルミナ製で、直径が38 mm、全長が13 mmである。各ノズル要素の中心部には陰極挿入用の直径0.2 mm、深さ1 mmの穴が開けてある。各陰極には直径0.2 mmのタングステン棒を用いた。Fig.3, 4に6×6アレイの推進機のノズル出口側（陽極, SUS製）の写真およびノズル1要素の拡大写真を示す。6×6=36個ある

ノズルの全高は12 mmである。Fig.5には、ノズル1要素の外観図を示す。ノズル1要素の出口角は1.9 mm, スロート径が0.2 mm, 長さが1 mmで、ノズル間の幅は0.1 mmとした。

以前使用した針状陰極を用いたアレイ推進機では、放電作動時に一部のノズルに強い発光が偏在する傾向が確認されたので、本研究ではノズル全体の放電箇所を均一化させるために、36個の各陰極に独立の抵抗を接続し、各電極の放電電流の制御を図った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機の放電作動

放電作動試験はノズル全体の推進剤流量2.1 ~ 10.4 mg/sec, 放電電流20 ~ 40 mAで行った。Fig.6にノズル出口部から観察した各放電電流の場合における放電作動実験時の画像を示す。図より、ノズル全体の放電電流が20 mA, 30 mA, 40 mAの場合において、比較的均一なプラズマの発光が確認できた。また、放電電流の増大に伴って全体的なプラズマの発光強度が増大することがわかる。

素材:アルミナ 99.5% + 素材:SUS

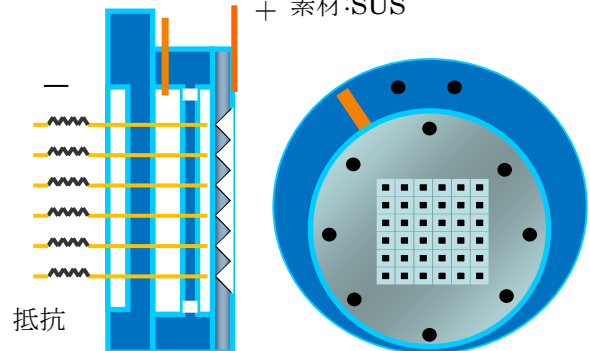


Fig.2 Isolation of each electrode array thruster.

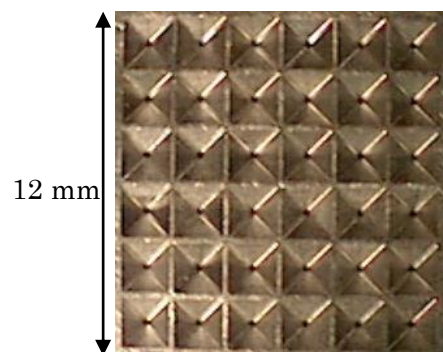


Fig.3 Photos of expansion 36 nozzles.

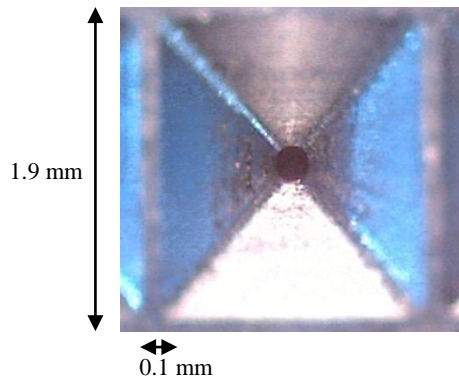


Fig.4 Photo of expansion 1 nozzle of 36 nozzles.

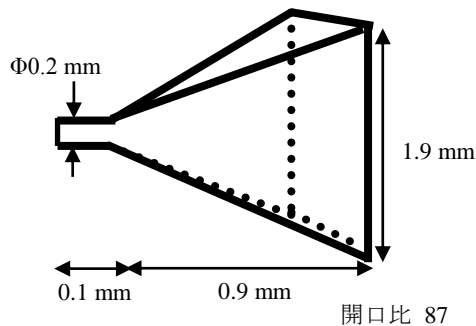
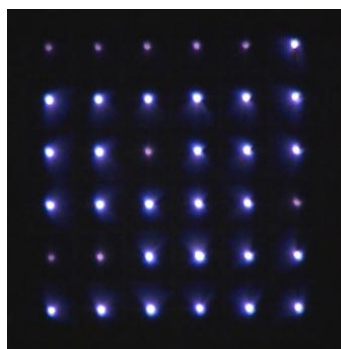
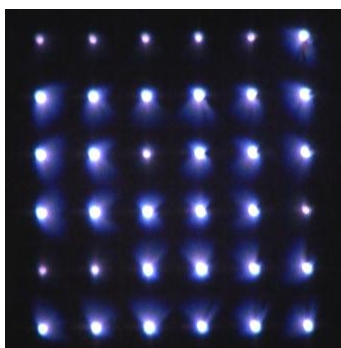


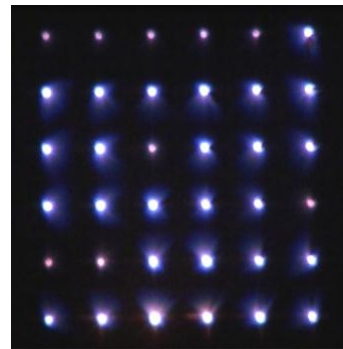
Fig.5 Schematic of 1 nozzle.



(a) 20 mA



(b) 30 mA



(c) 40 mA

Fig.6 Photos of plasma plumes operated under different discharge current

### 3.2 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機の推力測定結果

Fig.7に各種作動条件における6×6アレイ推進機の推力測定結果を示す。この場合、全体の放電電流を10～40 mAに増大させるのに伴って投入電力が3～15 Wに増大している。図より、投入電力(放電電流)および推進剤流量の増大に伴って推力が増大していることがわかる。推進剤流量が10.4 mg/secにおけるコールドガス作動時(0 W)の推力は6.1 mNであるが、投入電力15 Wの放電作動時の推力は9.0 mNに上昇し、すなわち約50%の推力上昇が確認できた。

Fig.8に各場合の比推力を示す。比推力も推力と同様に推進剤流量の増大に伴って増大する傾向がみられた。本実験条件における最大の推進剤流量(10.4 mg/sec)において、コールドガス作動時の比推力は60 secで、これに対して投入電力15 Wの放電作動時における比推力は88 secであった。また、図より、投入電力が3 W以下で推進剤流量が小さい場合(4.2 mg/sec以下)においては、比推力が40 sec以下であった。これは低流量のためノズル上流の圧力が小さく、超音速流れに至っていない状況と考えられる。

Fig.9に各場合の推進効率を示す。推進効率は推進剤流量の増大に伴って増大する傾向にあり、推進剤流量10.4 mg/sec、投入電力7 Wにおける推進効率は0.17であった。

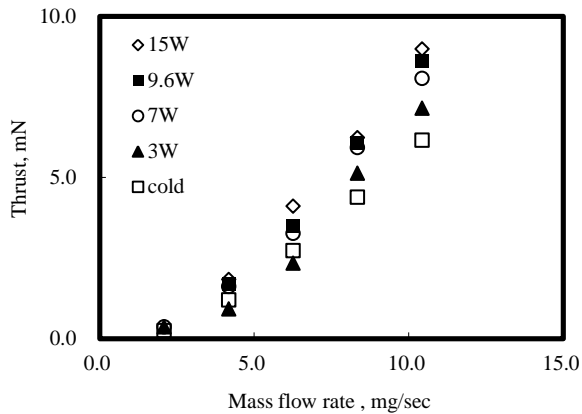


Fig.7 Thrust vs mass flow rate of nozzle performance.

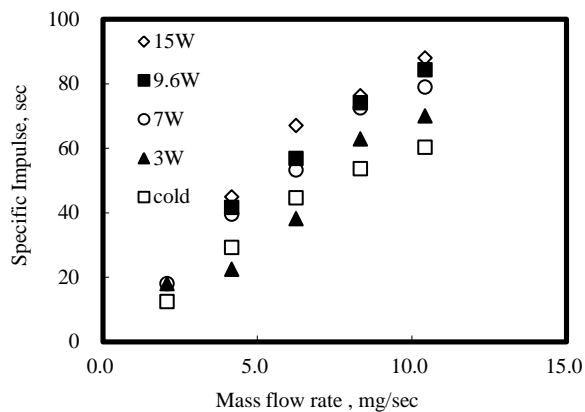


Fig.8 Specific impulse vs mass flow of nozzle performance.

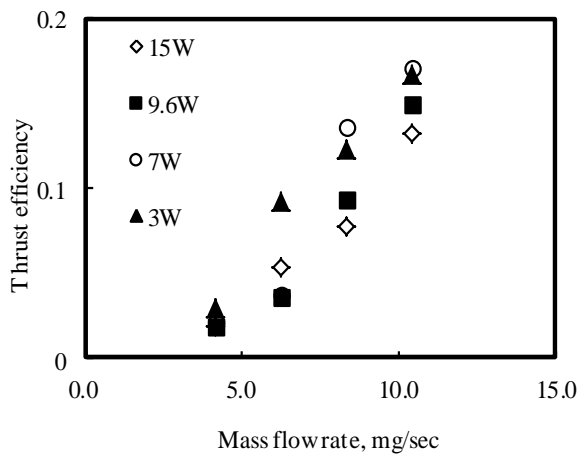


Fig.9 Thrust efficiency vs mass flow rate for comparison of nozzle performance.

6×6 アレイ推進機の推進性能を評価するために、過去に評価したマイクロ・シングル・プラズマジェット、ならびに 3×3 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機との推進性能の比較を行った。それぞれの場合でノズル数が異なるので、比較にお

いてはノズル 1 要素当たりの平均質量流量および投入電力、ならびに平均推力、比推力を算出しそれぞれプロットした。平均推力、平均比推力の結果をそれぞれ Fig.10 および Fig.11 に示す。各場合で作動条件が異なるためノズル 1 要素当たりの投入電力は異なっている。

Fig.10 より、各場合において、質量流量の増大により推力が直線的に向上していることがわかる。一方、Fig.11 におけるシングルと 3×3 アレイの比推力については、質量流量が増大するにつれて各場合で一定値に漸近する傾向が認められたが、6×6 アレイにおいては、直線的に向上していることがわかる。それぞれの図より、シングルとアレイ 1 要素当たりの推進性能を比較すると、アレイの方が高い推進性能を示しており、放電作動時においても排気噴流の干渉による推進性能向上の効果<sup>7)</sup>が確認されたといえる。

ノズル 1 要素当たりの推進剤流量 0.4 mg/sec における放電作動時の 3×3 アレイ推進機の平均推力 0.2 mN、平均比推力 45 sec (ノズル 1 要素あたりの投入電力 0.7W) であった。一方 6×6 アレイ推進機では、ノズル 1 要素当たりの推進剤流量が他の場合と比べて大幅に小さく同一の流量での比較が困難である。しかしながら、例えば 0.3 mg/sec における放電作動時の平均推力は 0.2 mN で平均比推力は 79 sec (ノズル 1 要素あたりの投入電力 0.2 W) で、3×3 アレイ推進機の場合よりも推進性能が大幅に向上していることが確認された。

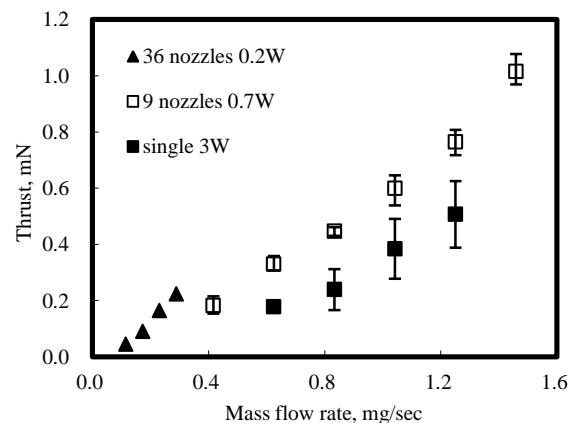


Fig.10 Thrust vs mass flow rate for comparison of nozzle performance.

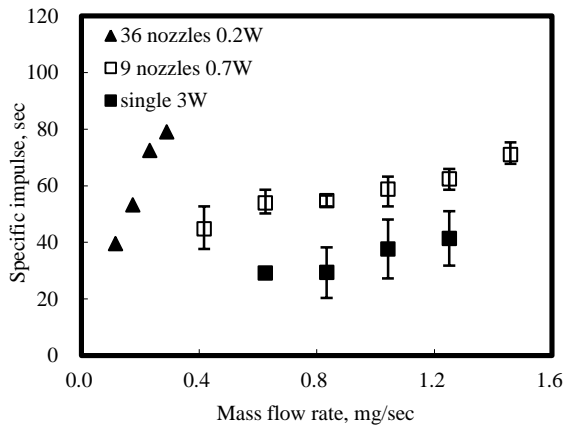


Fig.11 Specific impulse vs mass flow rate for comparison of nozzle performance.

#### 4. まとめ

本研究では、各電極（針状陰極）を孤立化させた新型のマイクロ・マルチ・プラズマジェットアレイ推進機（ノズル数 6×6）のプラズマの発光観察、コールドガス作動及び、放電作動における推進性能評価を行い、シングル・3×3 ノズルのアレイ推進機との推進性能の比較も行った。主たる結論は以下の通りである。

- (1) 各電極（針状陰極）の孤立化を図り、6×6 アレイ推進機で放電作動試験を行い、推進剤流量 2.1 ~ 10.4 mg/sec の範囲で、放電電流 20 mA, 30 mA, 40 mA の全てから比較的均一なプラズマの発光が確認できた。また、放電電流の増大に伴って全体的なプラズマの発光強度が増大することがわかった。
- (2) 6×6 アレイ推進機の放電およびコールドガス作動時で、推進剤流量が 10.4 mg/sec におけるコールドガス作動時（0 W）の推力は 6.1 mN、比推力は 60 sec となった。投入電力 15 W では、放電作動時の推力は 9.0 mN、比推力が 88 sec となった。また、投入電力が 3 W 以下で推進剤流量が小さい場合（4.2 mg/sec 以下）においては、比推力が 40 sec 以下であった。これは低流量のためノズル上流の圧力が小さく、超音速流れに至っていないと確認した。そして、投入電力 7 W における推進効率 は 0.17 となった。
- (3) 6×6 アレイ推進機の推進性能を評価するために、過去に評価した、マイクロ・シングル・プラズ

マジェット、ならびに 3×3 マイクロ・マルチ・プラズマジェット・アレイ推進機との推進性能の比較を行った。シングルとアレイ 1 要素当りの推進性能を比較すると、アレイの方が高い推進性能を示した。また、ノズル 1 要素当りの推進剤流量 0.4 mg/sec における放電作動時の 3×3 プラズマジェット・アレイ推進機では平均推力 0.2 mN、平均比推力 45 sec（ノズル 1 要素あたりの投入電力 0.7 W）となった。6×6 アレイ推進機では他の場合と比べて大幅に小さく同一の流量での比較が困難であったが、ノズル 1 要素当りの推進剤流量 0.3 mg/sec における放電作動時の平均推力は 0.2 mN、平均比推力は 79 sec（ノズル 1 要素あたりの投入電力 0.2 W）となり、6×6 アレイノズルの使用により、シングル・3×3 アレイ推進機の場合よりも推進性能が大幅に向上していることが確認された。

#### 参考文献

- 1) Horisawa, H., and Kimura, I., "Influence of Constrictor Size on Thrust Performance of a Very Low Power Arcjet," AIAA Paper 98-3633, July 1998.
- 2) Horisawa, H., and Kimura, I., "Optimization of Arc Constrictor Sizes in Low Power Arcjet Thrusters," AIAA Paper 97-3202, July 1997.
- 3) 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.
- 4) Horisawa, H., Ashiya, H. and Kimura, I.: Discharge Characteristics of a Very Low-Power Arcjet, IEPC 03-0078, 2003.
- 5) 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
- 6) Hagiwara, H., Kosuke Onodera, Tsuyoshi, N. and Kimura, I.: "Multi-Jet Effects of

Micro-Nozzle Array in Very Low-Power DC  
Micro-Arcjets," AIAA Paper 06-4496, July 2006

7) Horisawa, H., Sawada, F., Onodera, K., and  
Funaki, I.: Numerical simulation of micro-nozzle and  
micro-nozzle-array  
flowfield characteristics, *Vacuum*, 83(2008), pp.52-56.