

## アークジェット型電極とグロープラグを用いた推進剤気化器を有する プラズマ着火式低毒性スラスターの改良と性能評価

### R&D and Performance Evaluation of Green Propellant Chemical Plasma Ignition Thruster with Electrodes of Arc Jet and Propellant Vaporizer using Glow Plug

○笠原 真能・高橋 一真(首都大, 院)・田島 大雅(首都大, 学)・竹ヶ原 春貴(首都大)

○Masataka Kasahara・Kazuma Takahashi・Taiga Tajima・Haruki Takegahara (Tokyo Metropolitan University)

#### Abstract (概要)

SHP163, one of the HAN based propellant is low toxic and have high thrust performance compared with hydrazine. However, conventional solid catalyst, used by general RCS thruster, can't be used with SHP163 because of its high flame temperature and high oxidation atmosphere. So, we designed the thrusters with plasma ignition system instead of the solid catalyst. In our laboratory, the thruster with swirling Ar gas to generate plasma between coaxial cylinder electrodes has been developed until now. However, it needs new tank and pipe to supply Ar gas for satellite system. It results in high cost, weight and complicated satellite system. Therefore, we suggest a thruster without Ar gas. Generally, coaxial cylinder electrodes generate discharge path along the insulator wall without swirling gas, therefore, collision part between propellant and discharge plasma is few. So, we apply the electrodes in the shape of Arc Jet, because its cathode is positioned at the center of flow path and it is expected that collision part with propellant increase more than coaxial cylinder electrodes by using electrodes in the shape of Arc Jet. In this paper, we report R&D and performance evaluation of this new thruster and propellant vaporizer using glow plug.

#### 1. 研究背景及び目的

現在、人工衛星の3軸姿勢制御や軌道変更にはRCS(Reaction Control System)スラスターが用いられている。RCSスラスターには従来、推進剤にヒドラジンが用いられてきた。一般的にヒドラジンはイリジウム系固体触媒と用いられ、推進系のシステムが簡易的であり、今までに多くの人工衛星や宇宙機に搭載され、高い信頼性を得ている。しかし、ヒドラジンは高い発癌性を有しており、取り扱いにはプラグスーツや毒物を扱うための施設等が必要となる。そのため、衛星開発のコスト、取り扱いの点において問題を抱えている<sup>1)</sup>。そこでこのヒドラジンに代わるHAN(Hydroxyl Ammonium Nitrate)系低毒性推進剤 SHP163<sup>2)</sup>がISAS/JAXAにおいて開発された。SHP163は他のHAN系推進剤に比べると高比推力、高密度、低凝固点といった特徴を有しており、衛星のシステムを構成する上で優れた性能を有している。しかし、断熱火炎温度が非常に高く、高酸化雰囲気を形成するために従来の固体触媒は劣化や粉砕することが報告されている。

本研究室ではこの固体触媒に代わる新たな反応誘起機構として放電プラズマを用いた研究を行ってきた。先行研究において2次ガスにアルゴンを用いた推進機が開発されている<sup>3)</sup>。この推進機は同軸円筒型の電極を有しており、そ

の円筒流路内にアルゴンをスワールさせて流入し、Arプラズマを生成する。そしてSHP163を流入し、Arプラズマに接触させて反応誘起を起こす仕組みになっている。しかし、推進系のシステムに2次ガスを組み込むには新たにタンクや配管を衛星のシステムに追加する必要があり、重量やコストの増加、システムの複雑化が考えられる。そこで本研究では、2次ガスを用いずに電極間で形成される放電パスに直接、推進剤を接触させることで反応誘起を行う推進機の試作を行った。今回、新たな推進機を試作するにあたり、電極形状を同軸円筒型からアークジェット型の電極へ変更した。これは同軸円筒型の電極においてアルゴンをスワールさせないで放電を形成すると、円筒流路内の中央ではなく、流路壁面に沿う形で放電が形成され、同じ流路を通過する推進剤との接触率が低下すると考えられるからである。それに対し、アークジェット型の電極では流路中央にカソード電極があるため、推進剤と放電パスとの接触率向上が見込める。今回はこのアークジェット型電極を有する推進機について新たな気化器の試作と電極間構成の変更を行い、それぞれが性能に及ぼす影響について報告する。

## 2. スラスタ構成及び推進剤気化器の試作

### 2.1 スラスタ構成

以下図1にスラスタ構成図を示す。

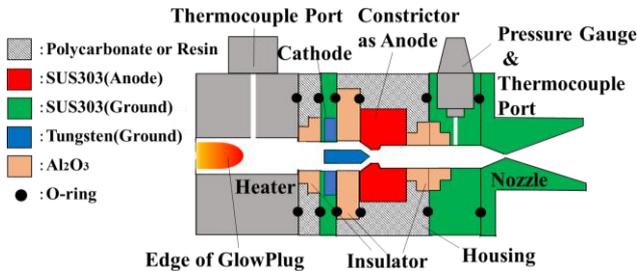


図1 スラスタ構成

本スラスタは、アークジェットと同じ電極を有しているが、あくまで電極は放電を起こし、推進剤と接触させることでラジカル等の活性種を発生させる役割を担う。ゆえに、発生したラジカルによる燃焼反応を起こすため、燃焼室を設けている。本スラスタにおいてはノズルスロート径が1.25mmであるため、ノズルスロートより上流でのチョークを避けるためにコンストリクタ径は2mmで設計を行っている。また、コンストリクタ長は1mmとした。カソードはフランジにはめ込む形状になっており、取り換えて複数の実験が行えるようになっている。カソード電極の根本にはφ1mmの穴が4つ円環上に開いており、推進剤が放電部へ供給できるようになっている。絶縁材にはアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を用いており、アノードとカソード、ノズルを絶縁している。また、カソードとノズルは共にグラウンド電位になっている。燃焼室には熱電対と圧力計が取り付けられるようになっている。電極の材質としてはアノードにSUS材、カソードにタングステン材を用いた。

### 2.2 グロープラグを用いた気化器

推進剤をスラスタに供給する際、従来はSUSの配管にニクロム線を巻きつけたニクロム線ヒータを用いていた。しかし、ニクロム線ヒータ単体で試験を行ったところ液体の推進剤がヒータ出口から流出しているのが確認された。また、このニクロム線ヒータをスラスタに適用した際にはノズル出口から未燃の推進剤が流出し、低い推進性能が取得されている。ニクロム線ヒータにおいて液体の推進剤が供給される原因としては、ニクロム線からの熱をSUSの配管を介して間接的に気化を行っているため、気化効率が低いことがあげられる。次に低い推力が取得されている一因として、ノズルスロート部において推進剤が気液二層流になっているため、音速が低下していることがあげられる<sup>4)</sup>。そのためチョークを起こしても推進剤の排気速度が音速の低下と共に低下するので推力が向上しないと考えられる。

以上の背景より、未燃の推進剤を低減することで性能向上に繋がるのではないかと考えた。そこで今回、新たにグロープラグを用いた気化器を試作した。以下図2にグロープラグを用いた気化器の図を示す。

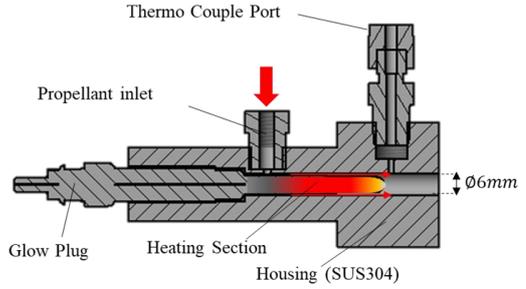


図2 グロープラグを用いた気化器

図2に示したグロープラグを用いた気化器は、日本特殊陶業製メタルグロープラグY-118Rを用いて構成されており、その加熱部に推進剤を接触させることで気化を行う仕組みになっている。今回、このグロープラグを用いた気化器を試作したことによって、従来のニクロム線ヒータよりも高温の推進剤を供給できるようになった。また、ヒータ出口での推進剤の状態も一部液体であったものが泡状になった。このことから、推進剤の気化率向上によって未燃の推進剤の低減が期待できる。

### 2.3 実験コンフィグレーション及びシーケンス

以下、図3に実験コンフィグレーションを示す。

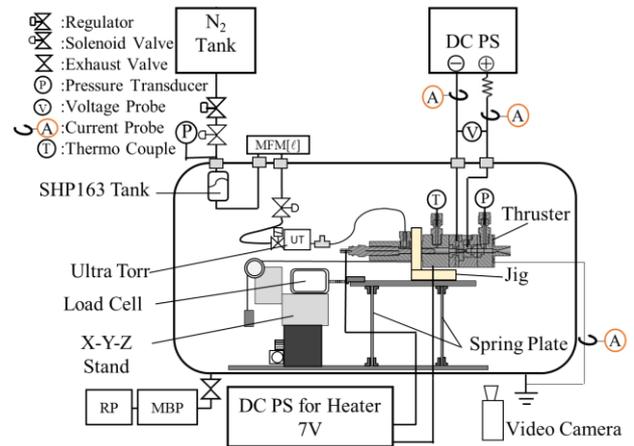


図3 実験コンフィグレーション

今回、放電の電流値をパラメータとし、電源の設定電流値を0.8A, 1.6A, 2.4Aで実験を行った。電流値は、アノード、カソード及びノズルに流れる電流を計測しており、いずれも電流プローブ(TCPA300, Tektronix, HIOKI3270及びHIOKI3272)を用いて計測している。電圧値は高電圧プローブ(P6015, Tektronix)を用いて計測した。実験はチャンバ内をロータリーポンプ(RP)及びメカニカルポンプ(MBP)を用いて10~100Pa程度にし、実験時はゲートバルブを閉じた状態で行った。推進剤流量はチャンバの外部に取り付けられたコリオリ流量計(MFM, FD-SS02A, KEYENCE)で測定している。推進剤は窒素タンクによるブローダウン方式で供給を行っている。また、気化器上流側には推進剤が加熱によって異常燃焼を起こし、配管内の圧力が上昇した際に、配管が自然と外れるように手締め配管(Ultra Torr,

Swagelok)を取り付け、安全対策を取っている。またスラスタ自体はばね板式のスラストスタンドに取り付けられており、推力はロードセル(LTS-200GA, KYOWA)にて計測している。

次に実験のシーケンスを以下図4に示す。

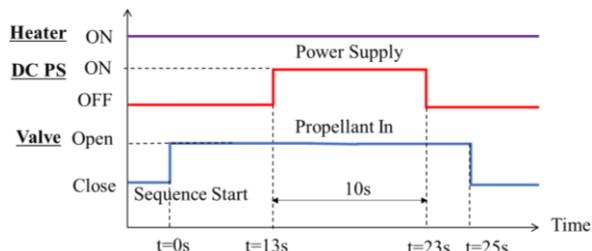


図4 実験シーケンス

実験シーケンスは気化器の内部温度を160℃以上に予熱した後を開始する。

1. 推進剤バルブ:OPEN
2. 放電電源:ON
3. 放電電源:OFF
4. 推進剤バルブ:CLOSE

シーケンス1と2間の時間差は、気化した推進剤がスラスタ内部に到達するまでの時間である。

## 2.4 新ヒータを適用したスラスタの燃焼試験

今回新たに試作したグロープラグを用いた気化器をスラスタに適用し、燃焼試験を行った。以下図5に実験結果波形を示す。

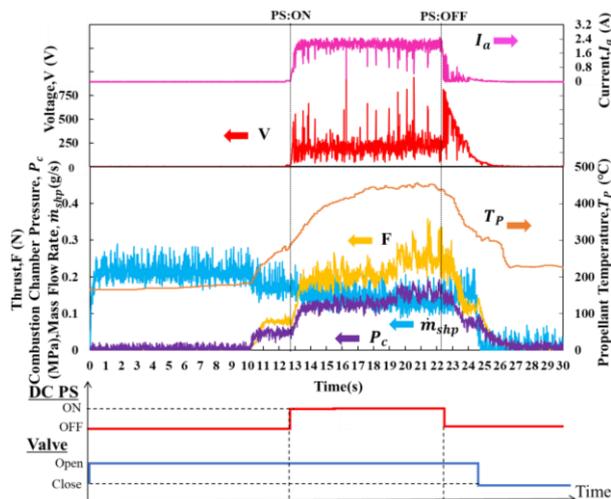


図5 実験結果波形

図5より、推進剤バルブを開けてから約10s後に推力と燃焼室圧が立ち上がっているのが分かる。この地点ではまだ放電の電源は立ち上げておらず気化した高温の推進剤のみがスラスタに流入している状態である。この時推力は約0.07Nとなっている。その後電源を立ち上げると推力と燃焼室圧がさらに上昇し、放電の電源を断ち下げる3s前の平均値で推力は0.25Nであった。そのため放電を印加したこ

とで推力は約0.18N分増加した。また、推進剤供給温度( $T_p$ )の波形を見ると作動中も定常的な温度で供給が行えており、その温度は約440℃に達している。これより、今回適用したグロープラグを用いた気化器がしっかりと作動していたと考えられる。

次に、ニクロム線ヒータとグロープラグを用いた気化器それぞれを適用した際の推進性能の比較と作動時の様子を以下図6、7に示す。

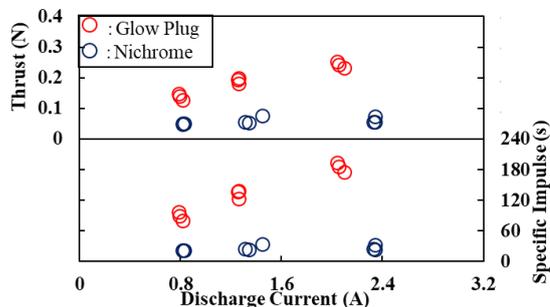


図6 気化器による推力・比推力の比較

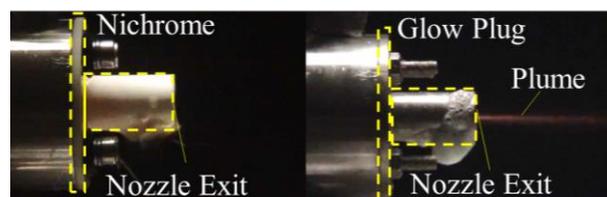


図7 気化器による作動時の様子

図6に示すようにニクロム線ヒータ適用時と比較してグロープラグを用いた気化器を適用したスラスタにおいて大幅な推進性能の向上が見られた。作動時には両ヒータ適用時に未燃の推進剤がノズル出口に確認された。しかし、ニクロム線ヒータでは液状なのに対し、グロープラグを用いた気化器では泡状であり、流出量も少なかった。また、グロープラグを用いた気化器適用時にはプルームも確認されており気化率の向上が推進性能向上に寄与したと考えられる。また、放電電流値の増加に伴い、推進性能も向上しているのが分かる。このことから気化率の向上によって放電が推進剤の反応誘起に寄与するようになったと考えられる。

## 3. 電極間構成の変更が推進性能に及ぼす影響評価

### 3.1 コンストリクタ長の延長

実験後のアノード電極を観察するとコンストリクタ発散部及び収縮部に放電痕が確認された。このことからコンストリクタの上下流に放電パスが伸びている(Low及びHighモード)と考えられる。そこで、Highモードでの接触率を高めるためにコンストリクタ長を延長して元の諸元のものと同推進性能を比較した。今回はコンストリクタ長を1mmから2mmに変更し、実験を行った。以下図8、9に実験結果を示す。

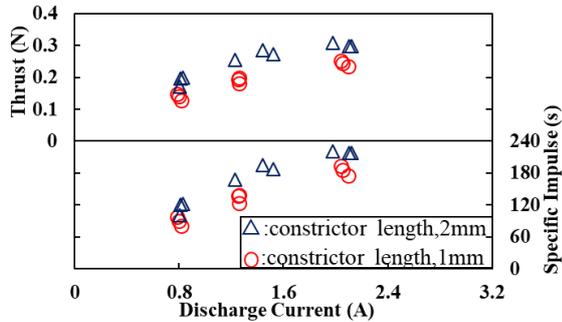


図8 コンストリクタ長による推力・比推力の比較

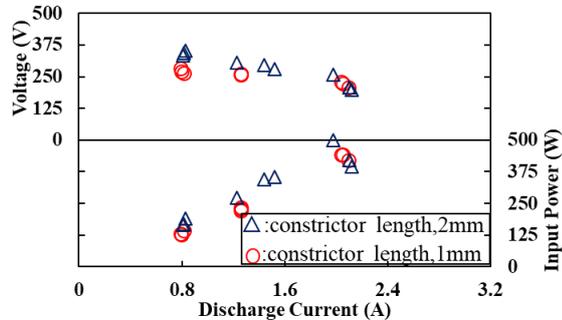


図9 コンストリクタ長による電圧・投入電力の比較

図8に示すようにコンストリクタ長2mmにおいて1mmのものと比較して推進性能の向上が確認できた。また、図9に示すようにコンストリクタ長2mmでは電圧値が全体的に向上していたため、Highモードが生じていたことが推進性能の向上に起因していると考えられる。

### 3.2 放電部軸方向の放電挙動確認試験

コンストリクタを延長した構成での実験結果を受け、内部の放電挙動を確認するために以下図10に示すスラスタ構成において実験を行った。

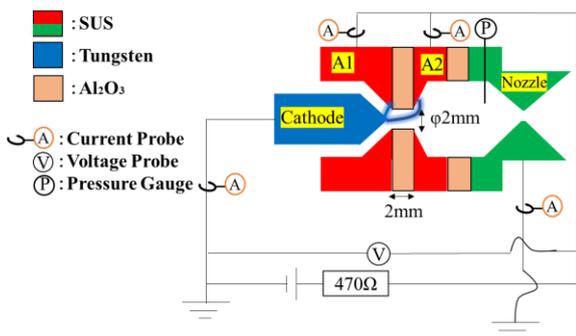


図10 アノード分割型スラスタ構成

図10に示したスラスタは2分割したアノード電極に絶縁材として内径2mm、厚み2mmのアルミナ材を挿入し、コンストリクタ長2mmの構成を再現している。分割した上下流の電極それぞれに配線が繋がっており、そこに流れる電流をプローブで計測することで放電パスの軸方向の挙動を観察した。以下図11に軸方向挙動確認試験の結果を示す。

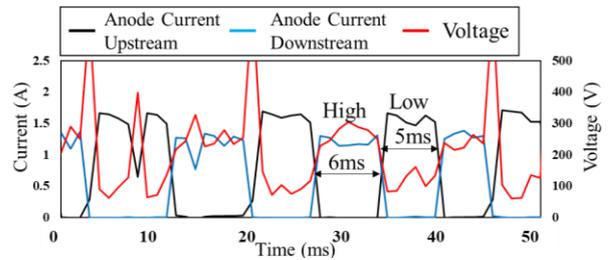


図11 放電軸方向挙動確認試験結果

図11は設定電流値1.6Aの時に取得された電流電圧波形である。波形を見ていくとコンストリクタ上下流に電流が流れており、LowモードとHighモードが繰り返して生じていることが分かった。またHighモードが生じているときは電圧値も高くなっているため、投入電力が大きいと考えられる。このHighモードが数msの間隔で生じることによって累積の投入電力が大きくなり、推進性能の向上に至ったと考えられる。

## 4. 結論

アークジェット型電極を有するスラスタ及び推進剤気化器の試作と性能評価を行い、以下の結論を得た。

### 推進剤気化器の試作及び性能評価

- ・グローブラグを用いた気化器によって従来のヒータ適用時に比べ、未燃の推進剤の低減及び推進性能の向上が確認された

### 電極間構成の変更が性能に及ぼす影響評価

- ・コンストリクタ長を1mmから2mmに延長したところ、推進性能の向上が確認された
- ・アノード電極を分割した構成において電極間軸方向の放電挙動を観察した結果、コンストリクタ上下流に放電スポットの移行を小刻みに繰り返していることが分かった

## 参考文献

- 1) 齋藤憲吉, 梶原堅一, 勝身俊之, 東伸幸, 小林梯宇, 今田高峰, 高田真一 “低毒性推進剤推進系研究開発計画,” H23年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2011-022, 2011
- 2) T.Katsumi, H.Kodama, T.Matsuo, H.Ogawa, N.Tsuboi, K.Hori “Combustion Characteristics of a Hydroxylammonium Nitrate Based Liquid Propellant .Combustion Mechanism and Application to Thrusters,” Combustion,Explosion,and Shockwave, Vol.45, No.4, pp.442-453, 2009
- 3) Asato Wada, “Study on Green Monopropellant Propulsion with Discharge Plasma System,” 首都大学東京博士論文, pp.25-31,56, 2017
- 4) 井口学, 武居昌宏, 松井剛一著, “熱流体工学の基礎,” 朝倉書店, 初版第1刷, pp.118-120, 2008