

HAN 系一液式プラズマ化学スラスタへの推進剤気化機構の適用評価

○高橋一真（首都大・院），青山翼（首都大・院），笠原真能（首都大・院），
松本宗弘（首都大・学），竹ヶ原春貴（首都大）

Application of Propellant Vaporization System for HAN-Based Monopropellant Thruster with Discharge Plasma

○Kazuma Takahashi, Tsubasa Aoyama, Masataka Kasahara,
Munehiro Matsumoto, Haruki Takegahara (Tokyo Metropolitan University)

Abstract（概要）

Reaction control system (RCS) thrusters have been used for attitude and orbit control of satellites. Generally, RCS thrusters utilize hydrazine which is usually classified as a hazardous material for the propellant. Thus, protective equipment and clothing are required to handle it, which results in increasing the cost of satellite development. To achieve a practical breakthrough in the development of RCS thrusters, several research institutions in the world have researched new low toxic propellants. In the past studies in our laboratory, a 1N-class monopropellant thruster using SHP 163, which is HAN-based green propellant, has developed and evaluated its performance. Although the thruster accomplished successful initial performance, unreacted propellant flowed out from the nozzle as a liquid state by increasing the propellant mass flow rate. This unreacted SHP 163 leads to decrease the thrust efficiency. Thus, to reduce unreacted propellant in the thruster, a heating system (heater) was designed, fabricated, and tested. The heater can vaporize the propellant before the propellant is fed into the combustion chamber. Demonstrating the experiment, it was found that the heater was able to reduce a part of the unreacted propellant

1. 研究背景

現在運用されている人工衛星や探査機などの宇宙機には、それらに対し適当な運動量やトルクを与え、所望の姿勢に導くための RCS (Reaction Control System) スラスタが搭載されている。

現行の RCS スラスタには、高性能・高信頼性の観点から、ヒドラジンを燃料とし触媒による分解反応を用いて推進を行う手法が多く用いられている。しかし、ヒドラジンは強い毒性・発がん性を有するため、取り扱う際には特殊な設備や防護服が必要となり、長年宇宙開発のコスト増加の一因とされてきた。そのため、毒性・発がん性が少なく、且つヒドラジンと同程度の性能を持つ推進剤の開発が、現在各国の研究機関で盛んとなっている。

本研究室では、ISAS/JAXA が開発した、HAN (Hydroxylammonium Nitrate) を主成分とする低毒性推進剤である SHP163 に着目し、推進機の研究開発を行ってきた。Table 1 に SHP163 とヒドラジンの性能の比較を示す。SHP163 は低毒であるほか、高密度、低凝固点、高比推力といった多くの利点を有しているため、実用化

が強く期待されている。

しかし、SHP163 は酸化力が高く、従来の触媒を用いたスラスタへの適用が難しいという研究結果が示されており²⁾、実用化には耐酸化性を有する新たな触媒の開発、あるいは新たな反応機構の開発のいずれかを達成しなければならない。そこで、本研究室では過去に、後者の新たな反応機構として、早い応答性の可能性を有する放電プラズマを用いたスラスタの開発を行い、推進性能の取得を行なった。

Fig 1 に本研究室で開発したスラスタの概略図を示す。本スラスタは次の 3 つのシーケンスによって作動する。

Table 1. 各推進剤の性能比較¹⁾

	SHP163	ヒドラジン
密度, g/cc	1.4	1.0
凝固点, K	<243	274
比推力, s	276	233
断熱火炎温度, K	2394	871
毒性 LD50 経口, mg/kg	500-2000	60
LD50 経皮, mg/kg	>2000	91

1. カソード上流のインジェクタから、プラズマ生成を補助する Ar ガスを流入させる。2. アノード-カソード間に電位差を与え、Ar の放電プラズマを生成する。3. 生成した Ar プラズマに推進剤である SHP163 を接触させることで、燃焼を誘起する。

Fig 2 に実験で得られたスラスタの性能を示す。横軸は推進剤である SHP163 供給圧 (流量に相当)、縦軸はスラスタの推力 (T)、比推力 (I_{sp}) を表している (本稿において推力は F で表していることに注意されたい)。破線はその流量時における SHP163 の理論推力を示している。Fig 2 から、推進剤の流量が増加するに従って、推力の理論値と実測値との偏差が大きくなっていることが分かる。これは、推進剤供給量の増加に伴い、燃焼室内での推進剤の燃焼が十分行われなくなっていることが原因だと考えられる。

この現象は実験時に目視でも確認されており、特に推進剤の供給圧 0.6MPa 以上において、スラスタ作動時にノズル出口から未燃の推進剤が液体のまま流出していることが分かっている。よって、このスラスタにおいて推進性能を十分に引き出すには、これらの未燃の推進剤量の低減を達成する必要があると考えられる。

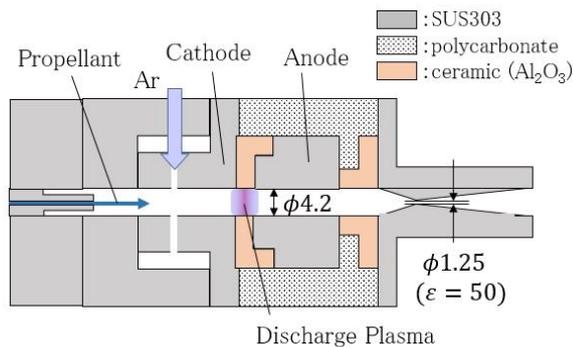


Fig 1. スラスタ概略図

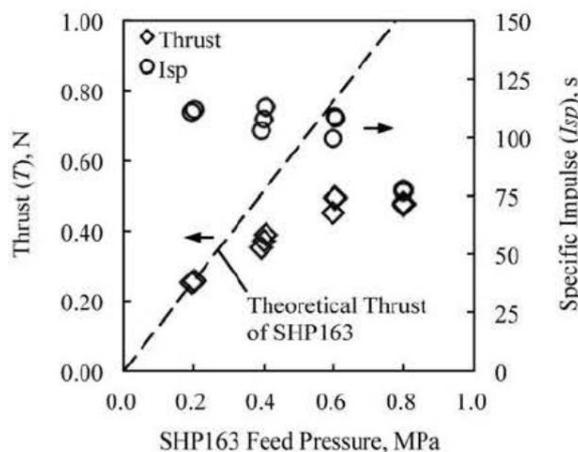


Fig 2. 推進供給圧-推力, 比推力の関係^[3]

2. 実験概要

2.1 ヒータについて

未燃の推進剤量の低減という上記の課題を解決するアプローチとして、本研究では燃焼前の推進剤をヒータで気化させるという方法を採用した。すなわち、従来の機構では推進剤を液体のままスラスタの燃焼室に供給していたのに対し、推進剤を事前に気化した後に燃焼室に供給することで反応性の向上を図る。

本研究で作成したヒータは、SUS303 の配管にニクロム線を巻きつけ、セラミックコーティングを施した構造となっている。ニクロム線に電流を流して予熱を行なったのち、配管に推進剤を流入させることによって推進剤の加熱・気化を行う。ヒータへの投入電力とその時の最高到達温度の関係を Fig 3 に示す。最高温度に達するまでに、真空中でおおよそ 5 分を要する。

また、ヒータに推進剤である SHP163 を通過させる実験を行なったところ、投入電力 20W でヒータ出口から推進剤が蒸気となって流出する様子が確認された。なお SHP163 は 154°C 付近で気化することが先行研究で示されている^[4]。

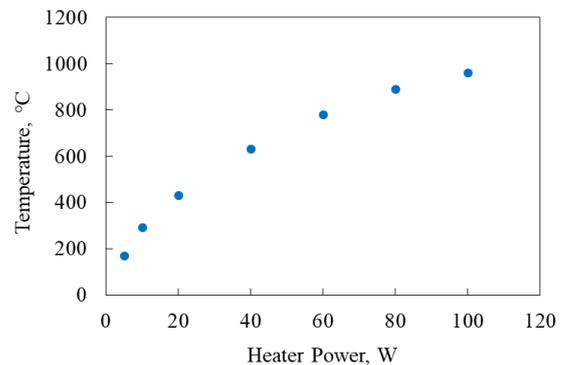


Fig 3. ヒータへの投入電力-最高到達温度

2.2 実験装置

Fig 4 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。

プラズマ生成のための Ar ガスの流量は 0.15g/s に固定し、流量を気体流量測定センサ FD-A10 (Keyence) で測定する。推進剤の供給にはブローダウン方式を用い、推進剤流量はコリオリ流量計 FD-SS02A (Keyence) により測定する。推進剤の供給圧は、推進剤タンク上流の圧力計を用いて測定し、その値はさらに上流のレギュレータを用いることで調圧可能である。Ar ガス供給系の最下流に設置されている圧力計は、スラスタの燃焼室圧力と同じ値を示すことが先行研究で確認されており、本実験においてもここで取得された値を燃焼室圧力として近似する^[5]。また、ヒータの上下流に K 種熱電対を設置しており、これを用いることでヒータによりどれだけ推進剤の温度が上昇したかを取得する。スラスタの推力測定にはロードセル LTS-200GAM2 (共和電業) を用いた。

実験は真空層内の減圧下で行い、開始時の圧力は 10Pa 以下となっている。SHP163 は腐食性を有するた

め、実験は真空ポンプの作動を止め、ゲートバルブを閉じた状態でスラスタの作動を行った。そのため、スラスタ作動中は Ar や燃焼ガスなどによって真空槽内の圧力は上昇を続け、30 秒間の作動によって槽内の圧力は最終的に 1kPa 程度にまで達する。

2.3 実験シーケンス

実験を行う前の 5 分間でヒータの予熱を行なったのち、次の 3 つのシーケンスでスラスタの作動を行う。

PHASE 1: カソード上流のインジェクタから、プラズマ生成を補助する Ar ガスを流入させる。

PHASE 2: アノード-カソード間に電位差を与え、Ar の放電プラズマを生成する。

PHASE 3: 推進剤の供給を開始。ヒータによって気化されたのち、Ar プラズマに接触させることで燃焼を誘起する。

2.4 実験条件および評価項目

Table 2 に実験条件および評価項目を示す。放電の条件に関してはヒータを使用していない実験との比較のため、従来の条件（電流制限値: 0.8A, 最大電圧値: 2kV, 定電流作動）をそのまま採用する。比推力(I_{sp})は、分母を $(m'_{SHP163} + m'_{Ar}) \cdot g$ として算出する。推進剤供給圧は未燃の推進剤の流出が特に顕著となる 0.6MPaG に設定した。ヒータへの投入電力は、事前の実験において推進剤の気化が確認された 20W (430°C) と、その倍の

Table 2. 実験条件, 評価項目

実験条件	<ul style="list-style-type: none"> ・電流制限値: 0.8A ・最大電圧値: 2kV ・SHP163 供給圧: 0.6MPaG ・ヒータ投入電力: 20, 40W (430°C, 630°C)
評価項目	<ul style="list-style-type: none"> ・推力 (F) ・比推力 (I_{sp}) ・Ar 供給圧 ($\approx P_c$) ・未燃の推進剤割合

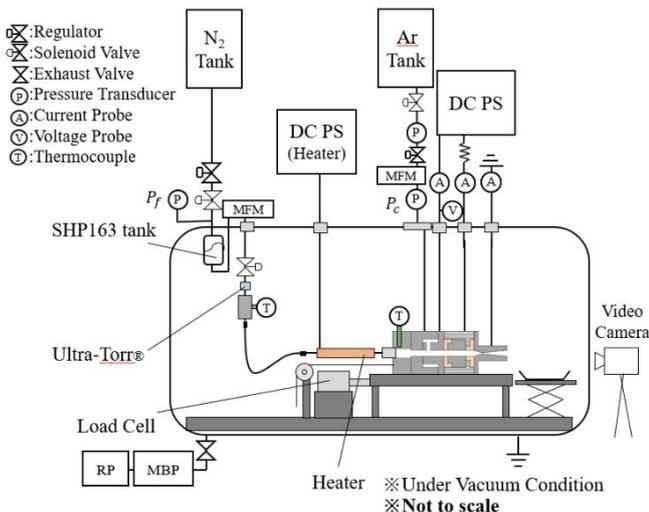


Fig 4. 実験装置概略図

40W(630°C)をパラメータとした。

評価項目の燃焼室圧力に関しては、2.2 章で述べたように、Ar 供給系の最下流の圧力計で取得した値を近似する。また、未燃の推進剤量は、スラスタのノズル出口付近に設置した容器で採取し計量した。未燃の推進剤の中にはこの容器で採取されなかった分が存在すると思われるため、ここで得られた値は未燃の推進剤量の最小値であると考えらるべきである。

各評価項目に関しては、スラスタの作動停止までの 5 秒間を平均して導出している。

2.5 安全対策

本研究では推進剤の加熱および気化を行っており、その取り扱いには十分に注意を払わなければならない。本実験では安全対策として、推進剤供給系の最下流のバルブ位置に Ultra-Torr®を設置した。これは、内圧と外圧の差が一定以上になると外れる仕組みを持ったコネクタであり、これにより万が一管内の圧力が急激に上昇した際にも事故を防ぐことができる。

3. 実験結果と考察

Fig 5 に実験で得られた波形の例を示す。下のグラフが放電波形（青：電流，赤：電圧）を表し、真ん中のグラフはアルゴンと推進剤の流量 (m'_{Ar}, m'_{SHP163}) および推力 (F), 燃焼室圧力 (P_c) を表している。一番上のグラフはヒータの下流（スラスタのインジェクタ付近）に設

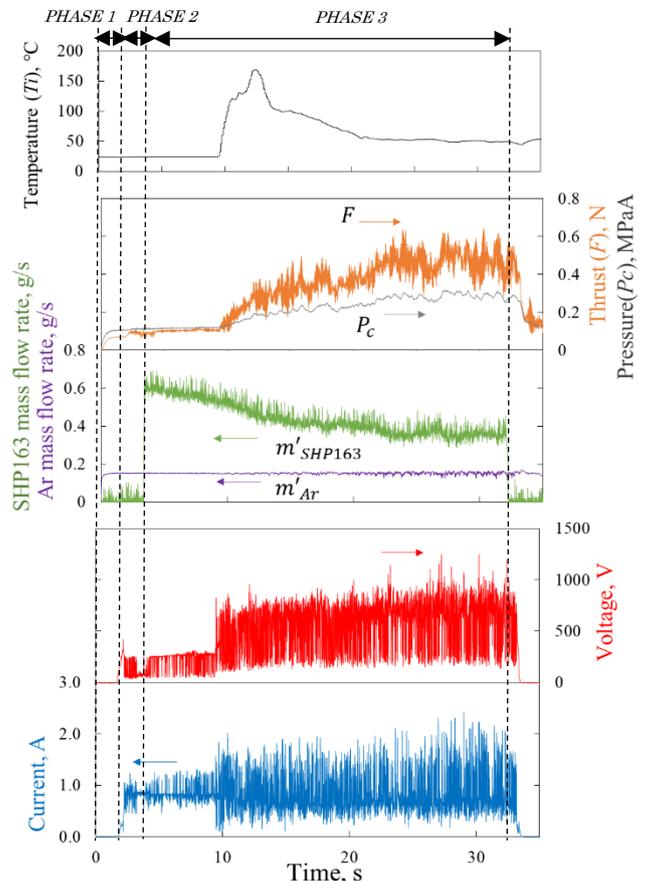


Fig 5. 実験結果の一例 (ヒータ消費電力: 20W)

置された熱電対によって取得された推進剤の温度 (T_i) を示している。この実験では、推力(F): 0.463N, 比推力(I_{sp}): 92.0s, 燃焼室圧(P_c): 0.288MPa, 未燃の推進剤割合: 7.22%, 推進剤温度(T_i)の最大値は 169°C, 定常時の平均は 50°C程度であった。

ヒータへの投入電力 20W と 40W の条件で 3 回ずつ実験を行い、過去のヒータを使用しない実験結果との比較を行なった。取得された値の比較を Table 3 に示した。また、Fig 6 (a), (b)は得られた結果をグラフにまとめたものであり、横軸にヒータの消費電力、縦軸に推力、比推力、流した推進剤のうち反応したと見られる割合(%)をそれぞれとっている。反応したと見られる割合については、実験時に容器で採取されなかった推進剤量から、供給した全推進剤量を除して算出している。

Table 3. ヒータ有無における実験結果の比較

		ヒータ無			ヒータ有				
実験条件	SHP163 feed pressure, MPaG	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		
	Heater power, W	-	-	20	20	20	40	40	40
実験結果	Thrust (F), N	0.50	0.45	0.42	0.46	0.50	0.45	0.45	0.49
	Isp, s	93.6	89.8	90.8	92.0	90.7	90.9	92.0	91.2
	Chamber pressure (P_c), MPaA	0.29	0.28	0.26	0.29	0.29	0.28	0.28	0.29
	反応したと見られる割合, %	85.0	82.8	90.5	92.8	99.4	90.1	95.6	89.8

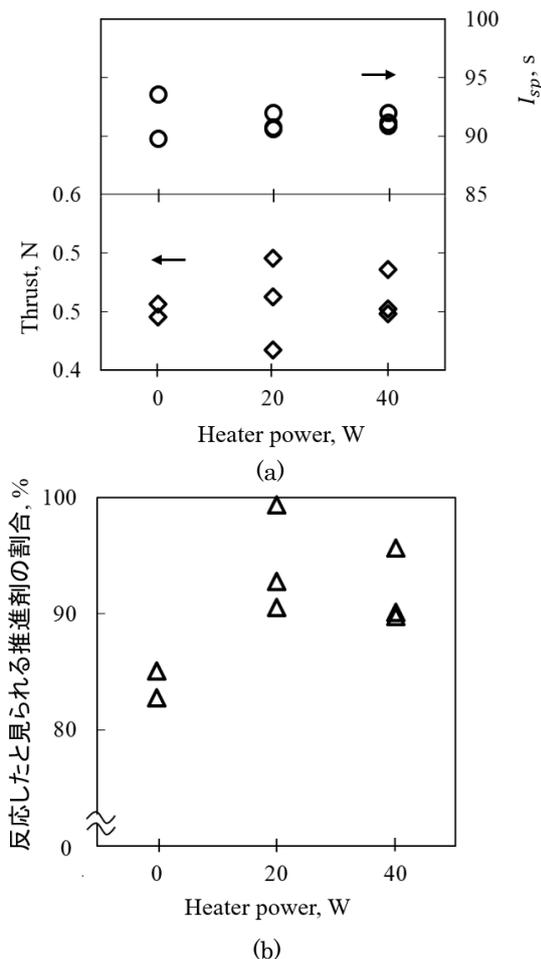


Fig 6. 消費電力に対するスラスタの各種性能

Fig 6 (a)からわかるとおり、ヒータ有無における推進性能に変化は見られなかった。しかし、(b)に注目すると、ヒータを作動させているの方が、反応したと見られる割合が高くなっていることが読み取れる。

このことは目視からも確認することができる。Fig 7 (a)および(b)にそれぞれヒータ無し、有りの場合におけるスラスタの作動時の写真を示す。ヒータ無しの場合ではノズルから未燃の推進剤が液体のまま流れ出ているのに対し、ヒータ有りの場合ではノズルから出る未燃の推進剤は泡の状態となっており、その量も抑えられている。

これらの結果から、従来のスラスタに対してヒータを適用することで、推進性能は変わらないものの、未燃の推進剤の量を半分程度まで低減できることが分かった。

ヒータ搭載によって推力等の推進性能が上がらない理由は以下の2つが考えられる。

- スラスタの部材には熱容量の比較的大きいステンレス材 (SUS303) を用いている。そのため、ヒータを通過して気化した推進剤がスラスタ内部の壁面に接触することで熱損失を受け、再度液化してしまっている。
- スラスタのノズル出口から液体が出ていることから、スラスタ内部での推進剤の状態は気液二相流であると考えられる。一般的に、気液二相流内における音速は単相流内の音速と比較して極端に低下する⁶⁾。そのため、スラスタのスロート部における流速が理論値よりも低くなってしまっており、ノズル出口において排気速度が低下する。結果、ヒータ有無に関わらず、推力は理論値に達していない。

一つ目の現象については、スラスタを構成する部材を変更する、あるいはヒータより下流に推進剤の温度を保持する何らかの機構を導入するなどの解決策が考えられ

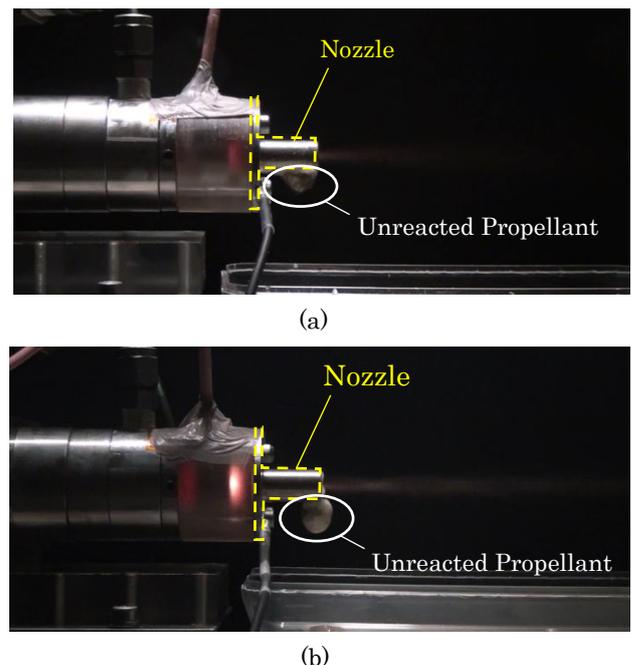


Fig 7. ヒータ有無におけるスラスタ作動時の様子 (a: ヒータ無し, b: ヒータ有り)

る。二つ目の現象については、ヒータの消費電力を上げて、推進剤の気化を完全に達成させることで解決可能だと推察される。

4. まとめ

本稿では、推進剤を気化させるヒータの製作を行い、スラスタに適用した場合の推進性能の変化を取得した。本実験を通じて、以下の知見が得られた。

- ヒータを適用したことによる、スラスタの推進性能（推力、比推力等）の変化は確認されなかった。
- ヒータを適用することにより、ノズル出口から液体のまま流出していた未燃の推進剤量を半分程度まで低減することが可能である。また、推進剤の状態も従来のような液体のままではなく、泡の状態となりノズルから排出される。

参考文献

- [1] 勝身俊之, 古澤雅也, パルスレーザーを用いた低毒一液推進剤の添加に関する実現可能性評価, 高エネルギー物質研究会, 2016.
- [2] 長田泰一, 増田井手夫, 斎藤憲吉, 梶原堅一, 田原弘一, 低毒性推進薬 (HAN 系) 用ガスジェネレータの試作, 第 56 回宇宙科学技術連合公演集, JSASS-2012-4191, 2012.
- [3] Asato Wada, Study on Green Monopropellant Propulsion with Discharge Plasma System, TMU, 2017, pp.14, 55-73.
- [4] C. Amrousse, et al. New HAN-based mixtures for reaction control system and low toxicspacecraft propulsion subsystem: Thermal decomposition and possible thruster applications, Combustion and Flame 162, 2015.
- [5] 和田明哲, 前田洋志, 進藤崇央, 渡邊祐樹, 竹ヶ原春貴, 低毒性一液式推進剤を用いた 1N 級放電プラズマスラスタの燃焼室圧力評価, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 65, No. 3, pp. 117-122, 2017.
- [6] 松井剛一, 武居昌宏, 熱流体工学の基礎, 朝倉書店, 2008.