

プラズマ支援燃焼を用いた小型スラスタの燃焼室圧力が アークプラズマ源に与える影響の評価

浅川人志¹, 村田浩章², 矢野康之³, 各務聡⁴

1 宮崎大学大学院工学研究科機械システム工学専攻, 2 宮崎大学工学部機械システム工学科,
3 宮崎大学工学部ものづくり教育実践センター, 4 宮崎大学工学部機械設計システム工学科

Hitoshi Asakawa^{1*}, Hiroaki Murata², Yasuyuki Yano³, Akira Kakami⁴

概要

SHP163のような液体推進剤や固体推進薬の燃焼を支援するためにアークプラズマ源を用いる宇宙用小型推進機が提案され、性能評価が行われてきた。これは、小型推進機の燃焼室に高エンタルピー流であるアークジェットを注入することにより、燃焼の効率を高め性能の向上と小型化をはかることを目的としている。一方で、燃焼室の圧力の変動はアークジェットに影響し、作動が不安定になることがあった。そこで、燃焼室の圧力変動を模擬する圧力容器を製作し、アークジェット下流側の圧力を0.05~0.3MPaの範囲で変動させて、燃焼室圧力の上昇がアークジェットの作動に与える影響を評価した。

1. 緒言

宇宙機用の液体推進機として、ヒドラジンを触媒により発熱分解させて推力を得る一液式推進機¹や、ヒドラジンと四酸化窒素のように酸化剤と燃料を別々に貯蔵し燃焼室で反応させる二液式推進機が用いられている。近年、液体推進機の燃焼の促進のためにアークプラズマ源を用いることが提案され、性能評価が行われてきた^{2,4}。Fig. 1は、プラズマ支援燃焼を用いたスラスタの例である。高エンタルピー流であるアークプラズマジェットをスラスタの燃焼室に供給して燃焼を促進し、性能向上と小型化をはかっている。

一方で、燃焼室がアークジェットの下流側に取り付けられたため、燃焼室の圧力変動によりアークジェットの作動に影響を受けることがあった。そこで、本研究では、燃焼室圧力の変化がアークジェットの作動に与える影響を調べるために、燃焼室の圧力変動を模擬する圧力容器を試作し、その圧力を0.05~0.3MPaの範囲で増加させて、アークジェットの応答性を評価した。

2. アークジェット

アークジェットの冷却法として、主に輻射冷却式と水冷式がある。そこで、今回は、Fig. 2と3のような2種類のアークジェットを試作した。アークジェットは、陰極とアノードを兼ねた陽極が同心円状に配置されており、電極間でアーク放電を誘起する。アルゴンなどの作動ガスは、Fig. 2と3の左側から燃焼室に相当するプレナム室に供給される。その後、電極間のアーク放電によりプラ

ズマ化し、ノズルにより膨張されてから超音速ジェットになる。陰極には電極損耗を抑えるため高融点金属であるタングステンを用い、陰極直径を2mm、陰極間距離は1mmとした。輻射冷却式アークジェットの場合、陽極には融点が高くタングステンに比べ機械加工性が優れる銅タングステンを使用している。

水冷式では、陽極として冷却のために熱伝導率の高い銅を使用し、ノズルのスロートに相当するプレナム周辺に冷却用の流路を設けている。いずれの冷却方式でも、アークジェットは高温になるため、陰極と筐体の絶縁には、耐熱性、機械加工性に優れているマシンナブルセラミック(マセライトSP)を使用した。

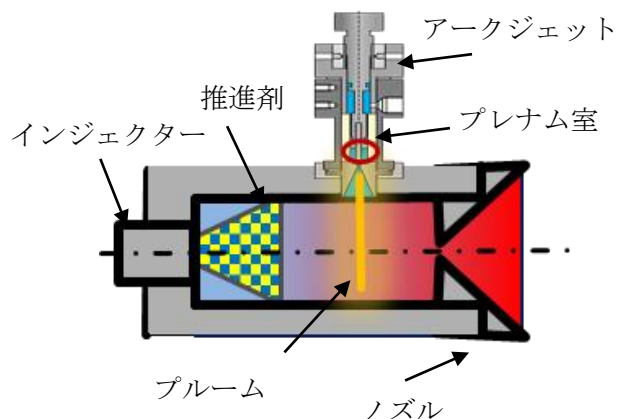


Fig. 1 アークジェットによる支援燃焼を適用した液体推進機

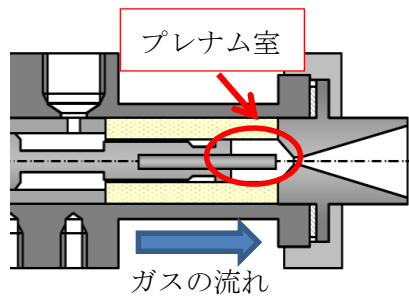


Fig. 2 輻射冷却式アークジェット

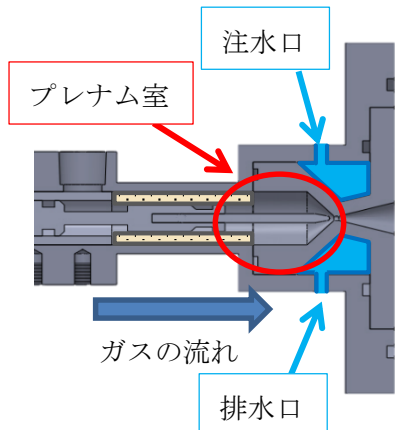


Fig. 3 水冷式アークジェット

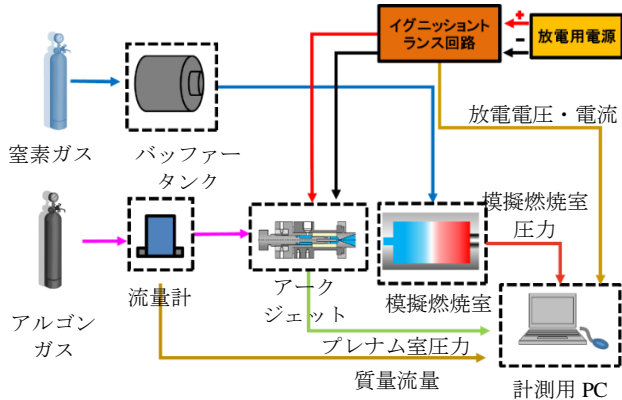


Fig. 4 実験装置概要

3. 実験装置

3.1 実験装置全体

実験装置を Fig.4 に示す. アークジェットは模擬燃焼室に接続されており, この模擬燃焼室の圧力をバッファに充填した窒素がより急速に上昇させる. アークジェットの作動ガスであるアルゴンは, 高圧ポンペに貯蔵されており, レギュレータを用いて 5 気圧程度にまで減圧し, マスフローコントローラを通してアークジェットに供給した. アークジェットは, 定電流電源により駆動され, その点火にはイグニッショントランスを用い

ている. 点火後, アーク放電が安定してからバッファのバーストダイヤフラムを破裂させて模擬燃焼室を窒素で急速に加圧する. このときのアークジェットの応答を評価するために, 放電電流, 放電電圧, プレナム室圧力, 模擬燃焼室内圧力, 作動ガス流量を PC で計測した.

3.2 模擬燃焼室

Fig.5 はアークジェット下流側の圧力を自由に変化させるための模擬燃焼室である. この模擬燃焼室にアークジェットを取り付けると共に, 圧力上昇のためにバーストダイヤフラム付のバッファを接続している. 模擬燃焼室の圧力上昇量 ΔP は, 大気側のボールバルブとバッファに充填した窒素の圧力で調整した.

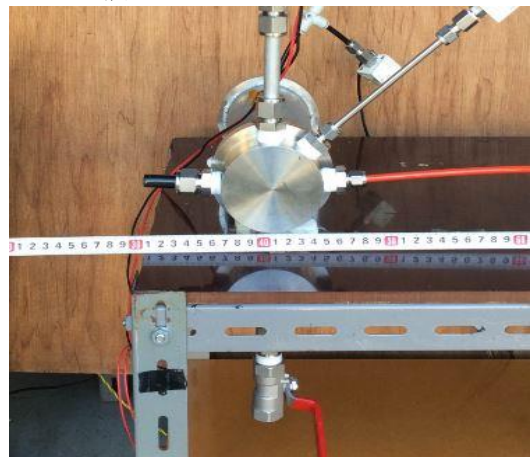


Fig. 5 模擬燃焼室外観

3.3. バッファ

Fig.6 はバーストダイヤフラム式のバッファである. 窒素ガスを充填して, 厚さ 0.2 mm のアルミ製のダイヤフラムを電磁アクチュエータにより破ることにより模擬燃焼室を急速に加圧する. なお, 圧力上昇の時定数は, 0.25 s であった.

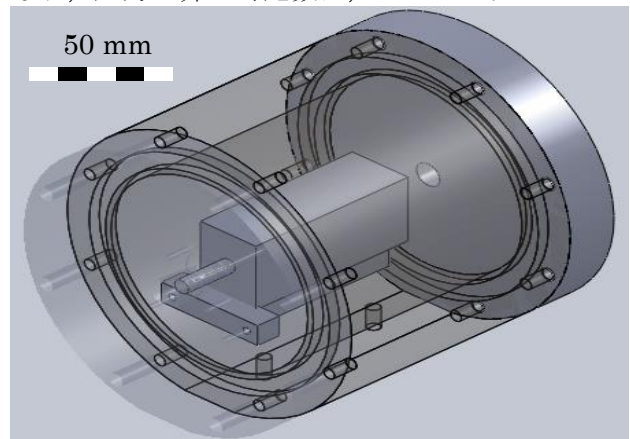


Fig. 6 バッファタンクの外形

3.4 実験条件

実験条件を Table 1 に示す。アークジェットの実作動ガスであるアルゴンの質量流量は 40 mg/s、放電電流は 15 A とした。模擬燃焼室の圧力は加圧前を大気圧(約 0.1 MPa)とし、模擬燃焼室の圧力の増加量 ΔP を 0.05 ~0.25 MPa とした。

Table 1 実験条件

開放端電圧 [V]	120
放電電流 [A]	15
ノズル開口比	1
質量流量 [mg/s]	40
初期圧力 [MPa]	0.1
上昇圧力 [MPa]	0.05, 0.1, 0.15, 0.18, 0.23, 0.25

4. 実験結果及び考察

4.1 圧力増加の時定数の影響

Fig. 7 に模擬燃焼室の圧力を $\Delta P=0.22$ MPa だけゆっくりと上昇させた場合(時定数 2.41 s)を Fig.8 に、模擬燃焼室の圧力を $\Delta P=0.12$ MPa 急速に増加

させた場合(時定数 0.25 s)のアークジェットの実作動の応答を示す。なお、時定数 2.41 s のときは、Fig. 6 のバッファを用いず、高圧ガスボンベから内径 4 mm のチューブを通して加圧用窒素を供給した。

Fig. 7 のように模擬燃焼室圧力を時定数 2.51 s でゆっくりと上昇させた場合、圧力上昇後に放電電圧は若干低下し 10 V になっていたが、アークジェットは放電を中断することなく作動し続けていた。

一方で、時定数が 0.25 s で急速に模擬燃焼室を加圧した場合、加圧直後にアークジェットの実作動が停止し放電電流が 0 A となり、放電電圧は開放端電圧である 120 V にまで戻っている。

以上のように時定数 2.41 s でゆっくりと $\Delta P=0.22$ MPa だけ加圧した場合には、アーク放電は中断しなかったが、 ΔP が 0.12 MPa と小さくても急速に加圧(時定数 0.25 s)した場合にアーク放電が中断していた。このことから、アークジェットの実作動は燃焼室の圧力上昇の時定数に影響されると言える。

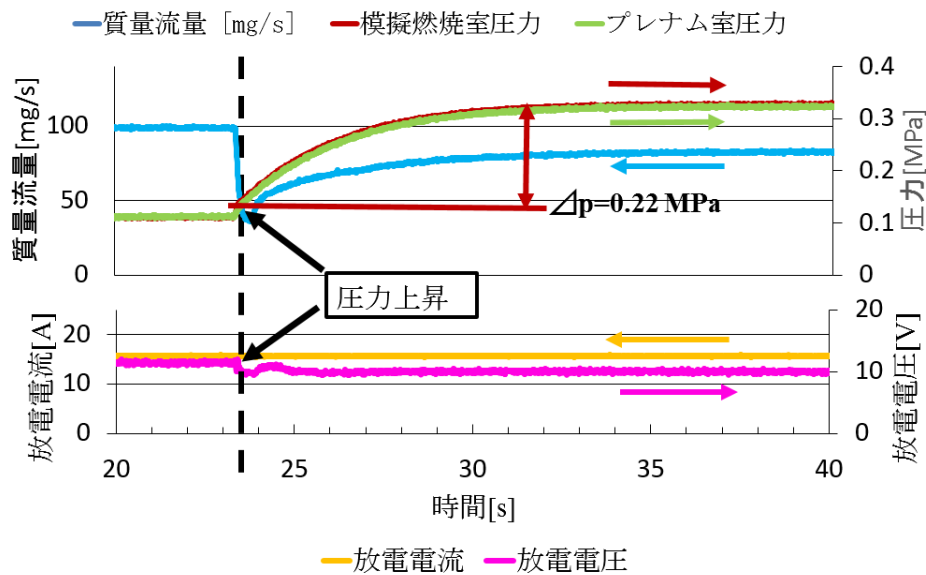


Fig. 7 時定数 $T=2.41$ で加圧したときの時間変化

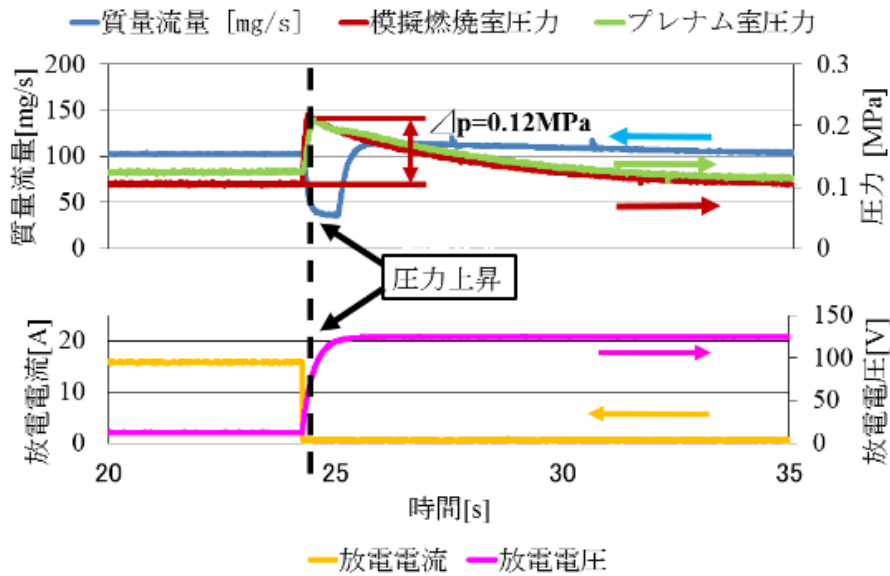


Fig. 8 時定数 $T=0.25$ で加圧したときの時間変化

4.2 模擬燃焼室の圧力増加量 ΔP の影響

Fig.9 に模擬燃焼室の圧力を ΔP だけ時定数 $T=0.25 \text{ s}$ で増加させたとき、アークジェットが圧力上昇後も停止することなく作動し続けた確率を示す。模擬燃焼室の圧力増分 ΔP の上昇につれて、アークジェットの作動し続けた確率が低くなっている。また、今回の実験

では、水冷式アークジェットの作動が中断する確率が高くなっていた。以上より、アークジェットの作動は、燃焼室圧力の増加量 ΔP とその変化速度(時定数 T)に影響を受けると考えられる。

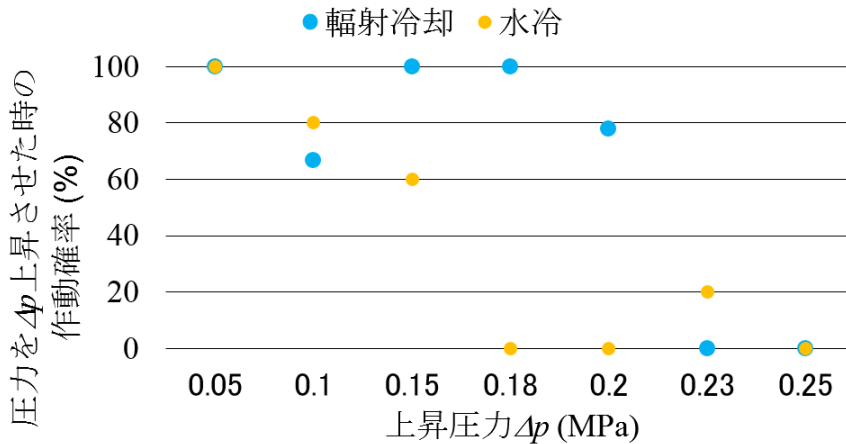


Fig.9 各上昇圧力での作動し続けた確率

5. 結言

本研究において、以下の知見を得た。

- 1) プラズマ支援燃焼を用いて燃焼を促進する液体推進機の安定作動を実現するために、燃焼室圧力の上昇がアークジェットの作動に与える影響について調べた。
- 2) 水冷式アークジェットと輻射冷却式アーク

ジェットを用いた圧力変動試験を行った。

- 3) 圧力上昇 ΔP が高くなると、アークジェットの作動が不安定になる。
- 4) 燃焼室の圧力上昇の時定数、すなわち圧力の上昇の時間がアークジェットの作動に影響を与えている。

参考文献

- 1) Kenji Hisatsune, Jun Isumi, Hiroyuki Tsutaya, and Katsumi Furukawa. Development of HAN-Based Liquid Propellant Thruster. *Proceeding of Asian Joint Conference on Propulsion and Power*. No. AJCPP2005-22041, 2005.
- 2) 青柳 潤一郎, 各務 聡, 竹ヶ原 春貴, 栗木 恭一, 橘 武史, 三島 弘行, 斉藤 憲吉, 長島 隆一. 放電プラズマによる一液式推進薬の分解促進検討, 2005
- 3) 各務 聡, 江川 拓, 山本 夏輝, 橘 武史. アーク放電支援燃焼を適用した亜酸化窒素/エタノール推進機の作動実験, 2010
- 4) Akira Kakami, Takuya Ishibashi, Keisuke Ideta, Takeshi Tachibana One-Newton class thruster using arc discharge assisted combustion of nitrous oxide/ethanol bipropellant, 2014