

放電プラズマを用いたグリーンプロペラントの反応誘起機構の試作

○河端駿典 (首都大学東京・学部), 飯塚俊明, 進藤崇央,
佐藤雄太 (首都大学東京・院), 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴 (首都大学東京)
Email: rcs@astak3.sd.tmu.ac.jp

Fundamental Characteristics of Reaction Initiation System with using Discharge Plasma for Green Propellant

Shunsuke Kawabata*, Toshiaki Iizuka**, Takahiro Shindo**, Yuta Sato**,
Junichiro Aoyagi**, and Haruki Takegahara**

*Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

**Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

Discharge plasma is proposed as a reaction initiation system for green monopropellants, especially for hydroxylammonium nitrate (HAN) based liquid monopropellant. This reaction initiation system has been researched as substitution of conventional catalytic decomposition system. In this study, laboratory model (LM) of the reaction initiation system were designed and built. The fundamental characteristics were investigated experimentally, based on the effects of frequency and helium mass flow rate on power consumptions. 25 W of power consumption were achieved at 5000 Hz of frequency and 0.02 g/s of helium mass flow rate.

Table 1 Performance Comparison ⁴

	Hydrazine	SHP163
Freezing point (K)	275	243
Density (g/cm ³)	1.0	1.4
Theoretical specific impulse (s)	239	276
Adiabatic flame temperature (K)	1183	2401

1. 背景および研究目的

従来の衛星における一液式姿勢制御用スラスタは、推進薬としてヒドラジンをを用いたスラスタが主である。ヒドラジンは 1950 年代から研究が進められており、搭載実績が豊富である点、長期間の貯蔵による物性の変化が小さい点などの特徴を有している。一方、毒性が高いため、推進薬の充填の際には特別な装備・施設が必要となり、多くのコストが掛かる。このため近年、これらヒドラジンの難点を克服し、更なる性能向上を目指して低毒性推進薬(グリーンプロペラント)が注目されている。

一液式グリーンプロペラントとしては、硝酸ヒドロキシルアンモニウム (Hydroxyl Ammonium Nitrate, HAN) 系やアンモニウムジニトラミド (Ammonium Di-Nitramide, ADN) 系などが国内外の研究機関や企業で活発に研究が進められている。¹⁻³ 筆者らは一液式グリーンプロペラントの一種である HAN 系推進薬 SHP163 に注目して研究を行ってきた。SHP163 は HAN/硝酸アンモニウム/水/メタノールが重量パーセント比 73.6/3.9/6.2/16.3 で配合された一液式グリーンプロペラントである。Table 1 にヒドラジンと SHP163 の性能比較を示す。SHP163 は低凝固点・高密度・高比推力であることから、今後ヒドラジンに替わる有望な推進薬として注目されている。

従来の姿勢制御用一液式スラスタの反応誘起機構には固体触媒が用いられる。固体触媒に推進薬が接触することで反応誘起させるため、構造が簡素であることから高信頼性を有している。一方、グリーン

プロペラントに従来の固体触媒の適用を検討すると、断熱火炎温度がヒドラジンに比べ高いことから、ヒドラジンに用いられている既存の固体触媒を適用することが困難であると考えられる。固体触媒は高温の生成ガスにより劣化し、触媒能力の低下や熱応力による粉砕が考えられ、推進性能低下やスロート部の閉塞に起因する不具合要因を内在している。そこで、既存の固体触媒の耐温性の向上、もしくは新たな反応誘起機構の開発が必要になる。

この中でも筆者らは新たな反応誘起機構として放電プラズマを用いる事を提案している。⁵ 放電プラズマはヘリウム等の不活性ガスを作動流体として生成する。⁶ 主な特徴としては、10~100W 程度の低電力でもってプラズマ生成が出来る点、幅広い周波数帯においてプラズマの生成が可能である点が挙げられる。

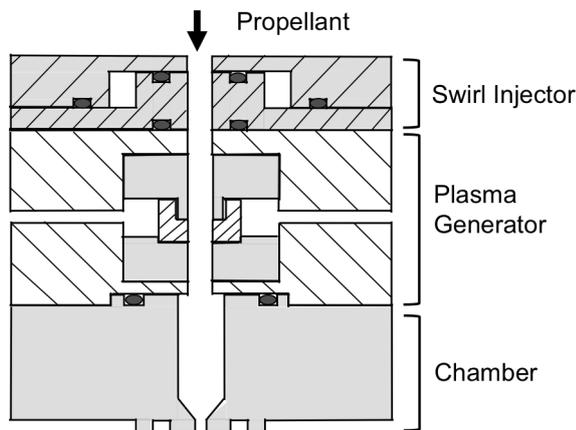
本研究室における過去の研究で、放電プラズマと SHP163 の基本的な反応特性を確認し、新たな反応誘起機構としての適用可能性を検討してきた。また、放電プラズマを用いた反応誘起機構の研究と同時に、SHP163 を推進薬とした 1N 級スラスタの開発に取り

組んでいる。その中でも、本研究ではスラスタに組み込む放電プラズマを利用した反応誘起機構を試作し、その基本的特性を取得する事を目的とする。

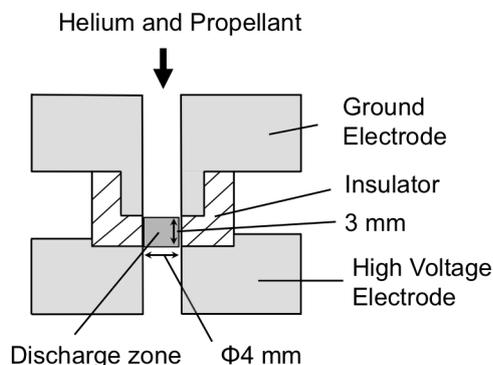
2. 1N 級スラスタおよび反応誘起機構概要

現在、本研究室で研究開発を行っている 1N 級スラスタおよび放電プラズマを用いた反応誘起機構の概要を Fig. 1 に示す。1N 級スラスタは、プラズマ生成用ヘリウムガス供給のためのスワール型インジェクタ (Swirl injector)、反応誘起機構 (Plasma generator)、および燃焼室 (Chamber) で構成されている。推進薬は Fig. 1 (a) 上部から噴射され、スワール型インジェクタにてプラズマ作動流体であるヘリウムガスと混合し、反応誘起機構である plasma generator (PG) の放電部 (discharge zone) にて反応誘起される。1N 級スラスタの初期作動実験では、大気圧下で行う予定であるため、ノズル部を除いているが、ノズル部を取り付け可能な設計になっている。

Fig. 1 (b) に PG の概要を示す。PG は高電圧電極、グラウンド電極、および絶縁体により構成している。放電部は直径 4 mm、長さ 3 mm の円筒形状である。



(a) Schematic of thruster with plasma generator.



(b) Detailed schematic of plasma generator.

Fig. 1 Schematic of 1N-class thruster with plasma generator.

PG はスワール型インジェクタおよび燃焼室との絶縁を保つため、外部は絶縁体によって覆われている。

3. 実験装置および条件

PG の基本的特性を取得するために使用した実験系概念図を Fig. 2 に示す。本研究ではヘリウムを旋回させることなく PG を単体作動させ、スワール型インジェクタが放電プラズマに与える影響を評価するための基本性能を取得した。実験条件を Table 2 に示す。ヘリウムガスの質量流量は 0.02 g/s を基準点としている。これは、1N 級スラスタにおける SHP163 の推進薬質量流量の約 10 % 程度であるが、今後 1 % 以下に減らす予定である。

電力供給システムは高電圧アンプおよびファンクションジェネレータにより構成され、直流(DC)および交流(AC)の出力に対応しており、最大 10 kV の電圧が印加可能である。この電圧は電力供給システムが印加可能な最大電圧であり、実際の放電電圧とは異なる値であることに留意されたい。AC 出力の場合、周波数は 5 Hz から 5000 Hz の間で変更し、消費電力への影響の評価を行った。

放電時の電流および電圧は高電圧プローブおよび電流プローブにて計測し、下記の式を用いて放電時における消費電力を求めた。

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T V \cdot I dt \quad (1)$$

P_{ave} は放電時における平均消費電力、 V および I は電圧および電流の瞬時値を表す。 T は放電時間である。電力交流電圧は正弦波にて印加し、on 時間 10 ms および off 時間 190 ms に固定して、5 回繰り返し放電を行った。

Table 2 Experimental conditions

He mass flow rate (g/s)	0.02
Frequency (Hz)	5, 50, 100, 1000, 5000
Voltage (kV)	10
Propellants	SHP163

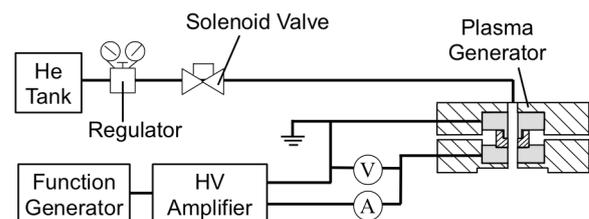


Fig. 2 Experimental apparatus.

4. 実験結果および考察

今回の実験条件内では、どの周波数においても放電プラズマの安定した生成を確認した。

Fig. 3 にヘリウム質量流量および周波数の放電時における平均消費電力への影響を示す。横軸に周波数、縦軸に平均消費電力である。Fig. 2 では、AC 出力および DC 出力の結果との比較を容易にするため、周波数 1 Hz は DC 出力の平均消費電力を掲載していることに留意されたい。

周波数に違いにおける放電時の消費電力への影響は、5000 Hz では約 25 W 程度で放電プラズマを生成・維持できることを確認した。触媒保温用ヒータ消費電力は 16 W 程度であることから⁴、放電プラズマを用いた反応誘起機構でも同等の電力で作動が可能であることを確認した。また、周波数の上昇にともない、平均消費電力は増加する傾向であることを確認した。推進薬質量流量や速度に応じた必要最小限のエネルギーを推進薬に効率よく投入することで、反応誘起機構の消費電力を削減できる可能性が十分にあると考える。

さらに、ヘリウム質量流量の違いによる消費電力への影響を詳細に評価し、可能な限りヘリウム質量流量を減少させる必要がある。このため、今後ヘリウム質量流量を推進薬質量流量の 1 % まで減少させた際の消費電力および消費エネルギーの評価を行う。また、スワール型インジェクタを用いて放電部の流れ場を変更した場合での消費電力への影響の評価を行う。

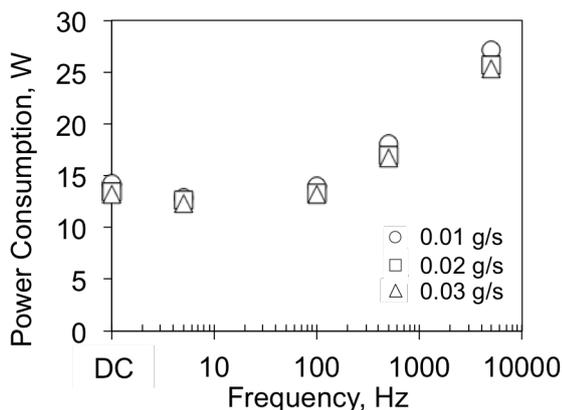


Fig. 3 Effect of frequency and helium mass flow rate on power consumption.

5. 結論

グリーンプロペラントを用いた 1N 級姿勢制御用スラスタへの放電プラズマ型反応誘起機構の試作を行い、その基本的特性（周波数およびヘリウム質量流量による放電時の消費電力への影響）を取得し、下記の結果を得た。

- ヘリウム質量流量の消費電力への影響は非常に小さく、今回の実験条件内での差異は確認できなかった。
- 本実験条件内での、最大消費電力は 25 W 程度であり、低電力での作動が可能であることを確認した。

References

1. T. Katsumi, H. Kodama, T. Matsuo, H. Ogawa, N. Tsuboi, and K. Hori, "Combustion Characteristics of a Hydroxylammonium Nitrate Based Liquid Propellant. Combustion Mechanism and Application to Thrusters," *Combustion, Explosion, and Shock*, Vol. 45, pp.442-453, 2009.
2. R. K. Masse, J. A. Overly, M. Y. Allen, and R. A. Spores, "A New State-of-The-Art in AF-M315E Thruster Technologies," 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2012.
3. K. Anflo, and B. Crowe, "First Results from IN-SPACE Demonstration of a Green Propellant System," IAA 50th Anniversary Celebration Symposium on Climate Change/Green Systems, 2010.
4. T. Matsuo, K. Furukawa, T. Nakamura, K. Hori, S. Sawai, N. Azuma, and H. Shibamoto, "Safety Evaluation of HAN-based Liquid Propellant and its Advantages Applied to a Spacecraft," IAA 50th Anniversary Celebration Symposium on Climate Change/Green Systems, 2010.
5. 飯塚俊明, 河端駿典, 進藤崇央, 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴, 長田泰一, "低周波プラズマジェットのグリーンプロペラントへの適用研究," 1J06, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012.
6. 北野勝久, 浜口智志, "低周波大気圧マイクロプラズマジェット," *応用物理* 第 77 巻 第 4 号, 2008.