

# スラスタ用低毒 1 液推進剤を対象にしたレーザー一点火特性の研究

古澤 雅也<sup>\*1</sup>, 北村 飛翔<sup>\*1</sup>, 勝身 俊之<sup>\*1</sup>

## Investigation on laser ignition characteristics for green monopropellant of thruster

Masaya Furusawa<sup>\*1</sup>, Tsubasa Kitamura<sup>\*1</sup>, Toshiyuki Katsumi<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

We performed laser ignition experiment of green monopropellant for spacecrafts and obtained its ignition characteristics. In conventional monopropellant thruster of a spacecraft, hydrazine is used as propellant and catalytic ignition is employed. However, it is dangerous to handle hydrazine because hydrazine has high toxicity. Furthermore, in catalytic ignition, a catalyst tends to deteriorate by the high temperature and oxidation atmosphere. Recently, the study on green monopropellant is focused by other researchers for improvement of safety, performance and saving cost in operation of a thruster. Moreover, it is expected to apply a microchip-laser to spacecrafts in the future. In this study, we obtained combustion characteristics of green monopropellant in laser ignition and evaluated the feasibility of laser ignition for green monopropellant for spacecrafts.

**Keywords:** Green monopropellant, Laser ignition, Droplet, Focal length, Propellant composition, Pressure measurement

### 概要

スラスタ用低毒 1 液推進剤を対象にレーザー一点火実験を行い、推進剤の燃焼特性を取得した。従来、宇宙機器のスラスタでは、ヒドラジンの触媒点火方式が採用されている。ヒドラジンは、高毒性であり、取扱性が問題視されている。また、触媒は高温酸化雰囲気において劣化し、スラスタの性能低下につながる事が知られている。近年、低毒性推進剤を用いることで、スラスタの開発の低コスト化、安全性向上、性能向上を目的とした研究が盛んである。さらに、自動車エンジン用小型レーザー装置を宇宙機器に応用することが期待されている。本研究では、レーザー照射実験における低毒 1 液推進剤の燃焼特性を取得し、スラスタへの実現可能性評価を行った。

---

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-008/0002

<sup>\*</sup> 平成 29 年 11 月 27 日受付 (Received November 27, 2017)

<sup>\*1</sup> 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻  
(Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

人工衛星のような宇宙機器では、1 液スラスタにより得た推力で宇宙空間での姿勢制御を行っている。従来、姿勢制御用 1 液スラスタの推進剤として、触媒によって容易に反応させられることから、ヒドラジン( $\text{N}_2\text{H}_4$ )が用いられている。しかし、ヒドラジンは毒性が高いため、取扱性や危険性が問題視されており、近年、ヒドラジンに替わる推進剤として、低毒性 1 液推進剤の実用化に向けた研究が盛んである。我々は低毒性 1 液推進剤の中でも、ヒドロキシル硝酸アンモニウム(HAN)系推進剤に着目した。HAN 系推進剤の特徴として、従来のヒドラジンよりも低毒性であるだけでなく、高密度、低凝固点であることから、取扱性、貯蔵性が優れている。さらに、HAN 系推進剤の中でも Togo らによって開発された SHP163(HAN / 硝酸アンモニウム(AN) /  $\text{H}_2\text{O}$  / メタノール( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) = 73.6 mass% / 3.9 mass% / 6.2 mass% 16.3 mass%)は HAN の特性である高い燃焼速度を抑制し、安全性だけでなく、推進性能を向上させた推進剤である[1]。Table1 にヒドラジンと SHP163 の各種特性を示す。

Table1 SHP163 とヒドラジン( $\text{N}_2\text{H}_4$ )の各種特性値の比較

※ 計算条件：圧力  $P_c=0.7$  MPa, 推力係数  $C_F=1.875$ (NASA-CEA<sup>17)</sup>)

		SHP163	$\text{N}_2\text{H}_4$
密度 $\rho$ [g/cc] @20°C		1.4	1.0
凝固点 [K]		<243	274
比推力 $I_{sp}$ [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

従来のヒドラジンスラスタでは、触媒点火方法が採用されている。HAN 系推進剤では、触媒点火方式だけでなく、電気着火方式が研究されている[2,3]。しかし、HAN 系推進剤の場合、断熱火炎温度が高く、高温酸化雰囲気における触媒や電極の劣化によるスラスタ性能の低下、つまりスラスタの寿命の低下が問題視されている。そこで、スラスタの長寿命化を実現させるため、燃焼室内部に構造物を必要とせず、劣化が生じないレーザー点火方法に着目した。レーザー点火では、レーザーエネルギー密度がある閾値を超えるとブレイクダウンによりラジカルが発生し、燃焼反応を促進させる。レーザー点火方法は、劣化しない利点がある一方、レーザー装置自体の重量や大きさから宇宙機器への応用は困難であると考えられてきた。しかし、近年、マイクロチップを用いた自動車エンジン用の小型レーザーが開発され、将来の宇宙機器への搭載も期待できる[4]。したがって、実現に向けたレーザー点火特性の取得及び評価は重要であるといえる。

これまでの研究では、レーザーエネルギーの照射によって、HAN 系推進剤は反応を開始す

ることが報告されている[5]。しかし、SHP163 のレーザー一点火に関する報告はされていないため、我々は国内で入手しやすい SHP163 の液滴を対象としたレーザー一点火の実現可能性評価を行っている。

先行研究では、SHP163 はレーザーエネルギーの照射によって部分的に反応を開始し、窒素酸化物を生成していることが分かっている。また、反応を開始するレーザーエネルギーの最小値として、15 mJ であること、40 mJ 以上の値になると一定の反応量に収束することが確認された[6,7]。しかし、レーザー照射と同時に、液滴の飛散が確認されていることや、チャンバー内の圧力上昇値の実験値が理論値のおよそ 5 分の 1 程度であることから、液滴は一部分しか反応していないこと、装置や液滴の組成がレーザー吸収の最適な条件ではないといえる。したがって、SHP163 のレーザー一点火における最適な条件を調べるため、集光レンズの焦点距離及び HAN の組成を変えてレーザー一点火実験を実施し、実現可能性評価を行った。

## 2. 実験装置及び方法

レーザー一点火実験では、HAN 系推進剤の液滴をチャンバー内で交差させた 2 本の石英線の交点に懸垂させ、集光レンズで絞ったレーザー光を照射した。Fig.1 に本研究で用いたレーザー一点火実験装置の概要を示す。実験時、SHP163 の量はおよそ  $0.5 \mu\text{L}$  (直径  $\phi 1.0\text{mm}$ ) とし、チャンバー内の雰囲気気を窒素、初期圧力を大気圧、初期温度を  $25^\circ\text{C}$  とした。点火用レーザー装置として、波長  $532\text{nm}$  の Nd:YAG レーザー(Quantel 製 EverGreen 145)を用いて実験を行った。また、チャンバー内の圧力上昇値の計測用圧力センサ(Honeywell FP2000)、レーザーエネルギーの測定用レーザーパワーセンサ(OPHIR PE50BF-DIF-C)を用いた。

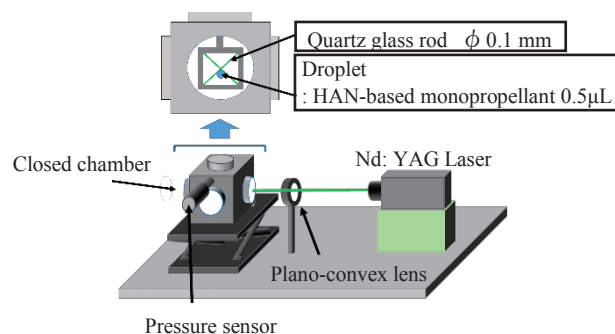


Fig.1 Experimental apparatus

本報告では、集光レンズの焦点距離が 120 mm, 200 mm, 250 mm の 3 種類を用意し、焦点距離の違いによる影響を調べた。また、推進剤の組成の違いを調べるため、SHP163, HAN 系推進剤(HAN / 硝酸アンモニウム(AN) /  $\text{H}_2\text{O}$  = 95 mass% / 5 mass% / 8 mass%), HAN 水溶液(HAN/ $\text{H}_2\text{O}$  = 92.8 mass% / 7.2 mass%)の 3 種類の推進剤を対象にレーザー一点火実験を行い、メタノール及び  $\text{H}_2\text{O}$  の影響を確認した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 焦点距離の影響

SHP163 を対象に，焦点距離 120 mm，200 mm，250 mm の集光レンズを用いて，レーザー照射から 10 秒後のチャンバー内の圧力上昇値を測定した結果を Fig.2 に示す．

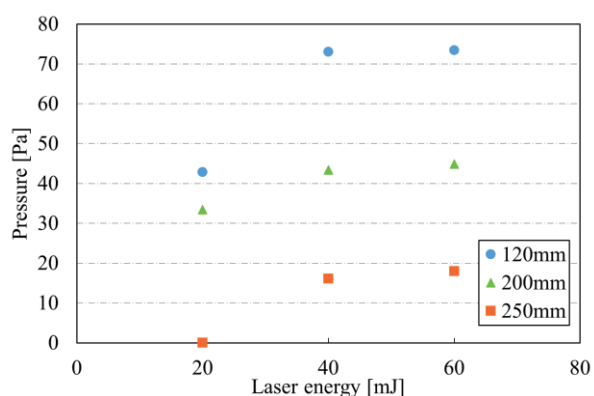


Fig. 2 Pressure value on each focal length at 20, 40, 60 mJ  
(10s after laser irradiation)

Fig.2 において焦点距離 120 mm の集光レンズの場合が 3 種類の中で最も高い圧力上昇値を示した．チャンバー内の圧力上昇値は，推進剤がレーザーエネルギーによって分解反応を起こしているためであることがわかっている[6, 7]．つまり，焦点距離が短いほど推進剤の分解反応を促進している．またレーザーの集光において，焦点のエネルギー密度は焦点距離に依存し，球面収差の影響から焦点距離が短いほどエネルギー密度が小さいことが報告されている[8, 9]．しかし，この報告では対象としている焦点距離の範囲が 50 mm から 150 mm であるのに対し，本実験では，120 mm から 250 mm の範囲を対象としており，焦点距離が短いほど高い圧力上昇値を示しているのは，球面収差の影響ではなく，焦点深度が長くなり，エネルギー密度が低下した影響が大きいと考えられる．また実験結果より，SHP163 のレーザー点火において焦点のエネルギー密度が高いほど分解反応を促進することが確認された．

#### 3.2 推進剤の組成の影響

推進剤の組成による影響を調べるため，SHP163，HAN 系推進剤，HAN 水溶液を対象にレーザー点火実験を行った．また集光レンズは焦点距離 120 mm を用いた．Fig.3 にチャンバー内の圧力上昇値の結果を示す．

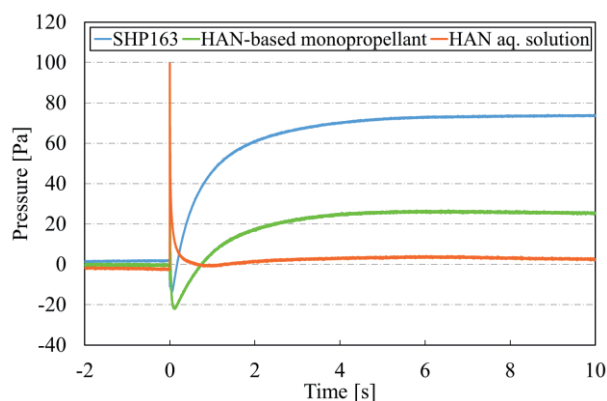


Fig.3 Comparison of time histories of pressure at 60 mJ

Fig.3 において、レーザー照射から 10 秒後の圧力上昇値を比較すると、SHP163 の値が最も大きな値を示している。これは SHP163 に含まれる硝酸アンモニウムのレーザー照射による分解反応で生成したガスがメタノールと反応しているためであると考えられる。また HAN 系推進剤は硝酸アンモニウムの分解反応により圧力が上昇しており、HAN 水溶液では圧力上昇がみられなかったため、分解反応が起こっていないと考えられる。Table2 にレーザー照射から 10 秒後の圧力上昇の実験値と完全燃焼時の圧力上昇の計算値の比較を示す。

Table2 Comparison of pressure for propellant

	Experimental value [Pa]	Calculated value [Pa]
SHP163	73.47	341.96
HAN-based monopropellant	25.61	336.73
HAN aq. solution	2.32	335.74

Table2 より 3 種類の推進剤においてレーザー一点火で得られた圧力上昇の実験値は、完全燃焼時の計算値よりも低いことがわかる。また、レーザー照射から 10 秒後の圧力上昇において、SHP163 の圧力上昇の実験値は HAN 系推進剤と HAN 水溶液よりも大きい値を示している。しかし圧力上昇の計算値を比較すると、大きな違いは見られない。3 種類の推進剤においてレーザー照射時に液滴の飛散がみられており、液滴の一部しか反応していないことが原因であると考えられる。

#### 4. まとめと今後の展望

低毒性 1 液推進剤を対象にレーザー一点火実験を行い、集光レンズの焦点距離と推進剤の組成による影響を調べた。実験結果より、レーザー照射によって推進剤の反応を促進できるという、実際の宇宙機への応用が可能であると考えられる。焦点距離は焦点でのエネルギー

密度に依存し、焦点距離が短いほどエネルギー密度が高く、推進剤の反応を促進できることがわかった。また、推進剤の組成の違いによる影響を調べた結果、HAN系推進剤やHAN水溶液と比較すると、SHP163の圧力上昇値が高い結果が得られた。これはSHP163がレーザー照射によって、硝酸アンモニウムの分解反応で生成したガスとメタノールの反応が影響しているといえる。

また、3種類の推進剤においてレーザー一点火で得られた圧力上昇の実験値は、完全燃焼時の計算値よりも低いため、レーザー照射による液滴の飛散を防ぎ、推進剤全体を反応させる工夫を今後検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) Togo S., Shibamoto H., Hori K., Proc. International Workshop HEMs 2004 (2004).
- 2) Amrousse R., Katsumi T., Niboshi Y., Azuma N., A. Bachar, Hori K., Catalysis A: General, 476, 45-46 (2014)
- 3) Iizuka T., Shindo T., Kawabata S., Sato Y., Aoyagi J., Takegahara H., Nagata T., The 29th International Symposium on Space Technology and Science (2013)
- 4) Taira T., Morishima S., Kanehara K., Taguchi N., Sugiura A., Tsunekane M., The 1st Laser Ignition Conference (2013)
- 5) Alfano, A.J., Mills, J.D., Vaghjiani, G.L., Combustion Science and Technology, 181, 902-913 (2009).
- 6) Katsumi, T., Kadowaki, S., Proc. 4th Laser Ignition Conference (2016).
- 7) Furusawa M., Katsumi T., Kadowaki S., The 31th International Symposium on Space Technology and Science (2017)
- 8) Hori T., Akamatsu F., Shibahara M., Miyata D., Katsuki M., Journal of High Temperature Society, 31, 122-128 (2005)