

発展型低毒性 1 液スラスタの地上燃焼試験

尾松来基, 黒田彬斗, 伊藤尚義 (長岡技術科学大学院工学研究科)
半澤佳祐 (長岡技術科学大学工学部), 勝身俊之, 門脇敏 (長岡技術科学大学)
鈴木直洋, 芳仲敏成, 堀恵一 (ISAS・JAXA)

Static firing test of advanced HAN-based monopropellant thruster

Raiki Omatsu, Yoshito Kuroda, Hisayosi Ito (Graduate School of Engineering,
Nagaoka University of Technology),
Keisuke Hanzawa (Nagaoka University of Technology)
Toshiyuki Katsumi, Satoshi Kadowaki (Nagaoka University of Technology)
Naohiro Suzuki, Toshinari Yoshinaka, Keiichi Hori (ISAS・JAXA)

Abstract

高性能な HAN 系 1 液推進薬は火炎温度が非常に高く、ヒドラジンの場合と比べて触媒が劣化しやすいという特徴がある。スラスタの性能向上には、触媒の耐久性と推進薬を効率よく燃焼させることが必要である。そこで、本研究では触媒の温度制御に着目し研究を進めている。今回実施した地上燃焼試験では、新規に開発した耐熱触媒ならびに新たに選定したインジェクタを採用し、これらの効果を燃焼器の圧力と温度データから評価した。耐熱触媒については耐久性に問題がないこと、またインジェクタの最適化により推進薬噴射後の触媒の温度低下が半径方向で一様になったことが確認できた。

1. 研究背景

現在、人工衛星をはじめとした宇宙輸送機に搭載されている姿勢制御用推進器(RCS)用の推進薬として、主にヒドラジンが用いられている。ヒドラジンは高い還元性を有し、触媒との反応性に優れているという特徴がある。しかし他方では、発がん性を有するなど毒性が非常に高く、安全性や保安の面で取り扱いが困難である^[1]。そこで、ヒドラジンに替わる高性能かつ低毒性の推進薬である硝酸ヒドロキシルアミン主剤の 1 液推進薬 (HAN 系 1 液推進薬) に着目し、衛星推進系へ適用

することを目指している。

日本では、2019 年に打ち上げられた革新的衛星技術実証 1 号機(RAPIS-1)の実証テーマとして、HAN 系 1 液推進薬を用いたグリーンプロペラント推進系(GPRCS)が搭載され、軌道上実証が継続中である。しかしながら、高性能の HAN 系 1 液推進薬は火炎温度が非常に高く、ヒドラジンの場合と比べて触媒が劣化しやすい。そのため、性能を十分に発揮するためには触媒の温度制御が必要不可欠である^[2]。

そこで、HAN 系 1 液推進薬を用いた推進系の高性能化を目指し、新しい燃焼制

御技術の研究開発（インジェクタの最適化，耐熱触媒の開発）を進めている。

長岡技術科学大学では，HAN 系 1 液スラスタの研究に関して，2016 年に小規模地上燃焼試験用装置の整備に着手し，2018 年に HAN 系 1 液スラスタの小規模地上燃焼試験を開始した。

2. 試験概要

本実験では，10N 級触媒スラスタを用いた地上燃焼試験において，最適化したインジェクタおよび新たに開発した高性能耐熱触媒を用いたスラスタの燃焼特性の取得・評価を行う。これまでに実施してきた短秒パルスモード（0.3 秒以下）での実験の再現性取得および発展的な位置づけとして，比較的長秒であるパルスモード（0.5-1.0 秒）での地上燃焼試験を実施する。

図 1 に，長岡技術科学大学で製作した小規模な地上燃焼試験用装置の外観図を示す。

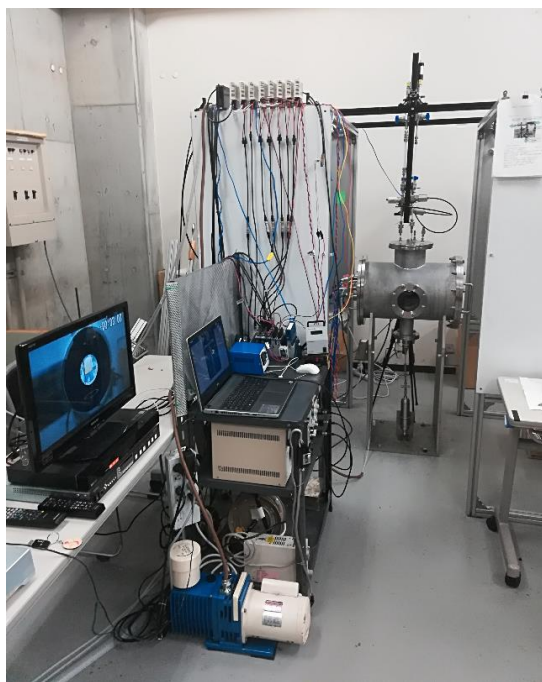


図 1 小規模な地上燃焼試験用装置

3. 試験目標（2019－2020 年）

- ① 地上燃焼試験用装置（供給系，操作系，計測系）の動作確認
- ② インジェクタの最適化
- ③ 新たに開発した高性能耐熱触媒の特性評価
- ④ 短秒モードにおける燃焼特性の取得・評価

4. 実験装置

図 2 にスラスタ部の模式図を示す。

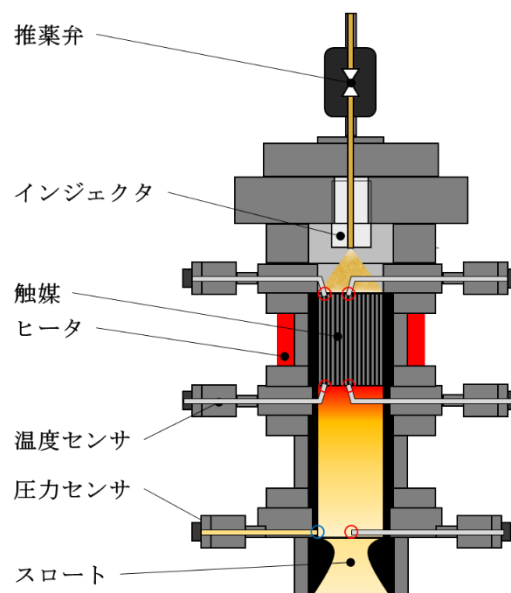


図 2 スラスタ部の構造

スラスタ部は，推薬弁，インジェクタ，触媒，ヒータ，温度センサ，圧力センサ，スロートから構成されている。スラスタ上部に接続されているキャピラリの上流に推進薬タンクが配置されており，推薬弁の開閉により推進薬の噴射を制御する。

触媒の温度は熱電対により測定し，触媒上端と下端それぞれの中心部および外周部の温度を取得できる。また，燃焼器内の圧力は，スロート入口付近に設置された圧力センサにより取得が可能である。インジェクタにより微粒化された推進薬

は、触媒によって分解反応が生じる。分解したガスは、燃焼器内で燃焼し、スロートを通じて排気される。

実験時は宇宙空間での使用を模擬して、スラスタ部を真空槽内に挿入し、真空雰囲気中で燃焼試験を実施する。

5. 試験条件

過去に長岡技術科学大学で取得した試験データと比較し、インジェクタの最適化による温度制御の効果を評価する。さらに、触媒の予熱温度条件を追加し、触媒予熱温度と圧力上昇値との関連性を評価する。表1に試験条件を示す。

表1 試験条件

項目	過去の実験	今回の実験
インジェクタ材質	樹脂製	ステンレス
噴射方式	旋回式フルコーン	旋回式フルコーン
噴射角[°]	72	53
※水の場合	(0.3MPa)	(0.6MPa)
触媒予熱温度 [°C]	200, 300	200, 250, 300
触媒持持金属	非劇毒物 ※一般的な貴金属系	
触媒構造	円柱型メッシュ構造	

6. 試験結果

過去に実施した試験結果および今回の試験結果について、これらの燃焼器圧力履歴を図3、触媒温度履歴を図4に示す。

なお、各々のグラフにおいて、推進薬が開いた時点を0に合わせている。また、触媒温度履歴については、推進薬噴射に伴う温度変化が顕著である触媒上端の温度履歴を取り上げた。

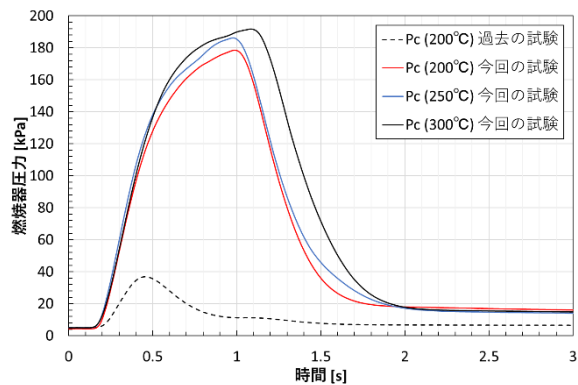


図3 燃焼器圧力履歴

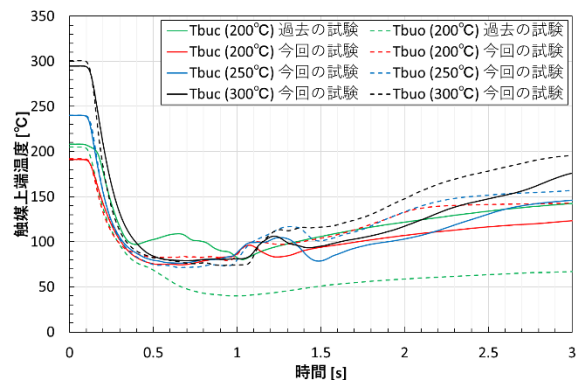


図4 触媒温度履歴

7. 考察

インジェクタを新たに選定したことにより、燃焼器圧力の増大が確認できた

(図3). 最高到達圧力に着目すると約4.5倍になり、圧力の立ち上がりについても応答性が向上していることが見て取れる。

また、推進薬噴射後の触媒の温度低下に関して、触媒の外周部と中心部で温度低下がおおよそ一定になっていることが確認できる(図4)。つまり、触媒の寸法に対して噴射角が最適化されたことにより、推進薬の反応が活性化したと推察される。

今回実施した試験では、触媒の予熱温度を3項目に設定し、燃焼器圧力および圧力応答性(立ち上がり性能)との関連性を評価した。図3より、触媒の予熱温度が高いほど燃焼器の最高到達圧力が高くなっていることが確認できる。つまり、触媒

の予熱温度はスラスタの噴射性能に影響すると考えられる。

さらに、圧力応答性（立ち上がり性能）についても性能の向上が見られる（図3）。推進薬の噴射後から燃焼器圧力が約100[kPa]に到達するまでの時間において、圧力上昇勾配がおおよそ等しいことがわかる。これもインジェクタを最適化したことによって、推進薬の反応が安定化したと推察される。

推進薬噴射後の触媒温度については、過去の試験結果に比べて触媒の中心部と外周部との温度差が低減していることがわかる。さらに、今回の試験では、推進薬噴射後の触媒の温度低下勾配はおおよそ等しく、80 [°C]前後でバランスしていることが確認できる。推進薬噴射後の触媒の温度については、100 [°C] 前後でバランスすると良いという知見があるが、それと比較すると今回の触媒温度は低いといえる。今後は、触媒温度を加味したうえで、触媒と推進薬流量との関係の最適化をする必要がある。

8. 結論

- ・インジェクタ変更による効果

噴射が一様になったことで、触媒の温度低下が半径方向で一様になった。これにより、燃焼圧力の増大および応答性の向上が確認された。

- ・今回の燃焼試験において、触媒の耐久性については問題ないといえる。

9. 展望

燃焼効率の向上を目指し、触媒長、触媒担持金属の最適化および触媒予熱温度と推進薬流量との関係の最適化を行う。

謝辞

本研究は、平成31年度宇宙工学委員会戦略的開発研究費の支援を受けている「革新的な衛星バス技術の研究」の一環として実施した。また、JAXA 能代ロケット実験場での地上燃焼実験の実施にはISAS/JAXA 福田盛介先生、澤井秀次郎先生、石井信明先生の多大なるご助力を賜った。

参考文献

- [1] 福地亜宝郎，長瀬栄，丸泉春樹，綾部統夫：HAN/AN ベース無毒スラスタの開発（IHI 技報 Vol.49），p.157（2009）
- [2] 勝身俊之：2019 年度 HAN 系 1 液スラスタの地上燃焼試験実験計画書（2019）