

ダイレクトインジェクション型ガスハイブリッドロケットの特性 排気速度効率に関する検討

○池上友隆 幡野慎太郎 長尾一輝 (千葉工業大学・院)
和田豊 (千葉工業大学)
馬場開一 小田達也 (日油株式会社)
長谷川克也 堀恵一 (宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所)

Study on characteristic exhaust velocity efficiency for direct injection type gas hybrid rocket

Tomotaka Ikegami, Shintarou Hatano, Kazuki Nagao, Yutaka Wada (Chiba Institute of Technology)
Kaiichi Baba, Tatsuya Oda (NOF CORPORATION)
Katsuya Hasegawa, Keiichi Hori (JAXA/ISAS)

1. 研究目的および背景

現在、宇宙機に搭載される推進系には化学推進、電気推進の2つが存在する。化学推進では推力の制御が可能な液体ロケットが採用されることが多く、軌道投入用スラスタとして人工衛星に装備される。しかし、液体ロケットで従来使用されてきた推進剤のヒドラジンなどは人体に有害であったり、液体酸素や液体水素などは極低温のため温度調節が必要であったり取り扱いが困難である。また、推進剤を燃焼室に供給するために加圧機構を搭載する必要があるため推進系が複雑になり重量が増加する。

これらの課題を解決する新たな推進系としてガスハイブリッドロケットシステムに注目した。ガスハイブリッドロケットはプラスチックなど固体の不活性ポリマを燃料に使用するため安全性が高い。更に、酸化剤には自己加圧性を有する液体亜酸化窒素 (Nitrous Oxide 以下 N_2O) を使用することで加圧機構が不要になるといった特徴を有する。ガスハイブリッドロケットの構造を以下図1に示す。

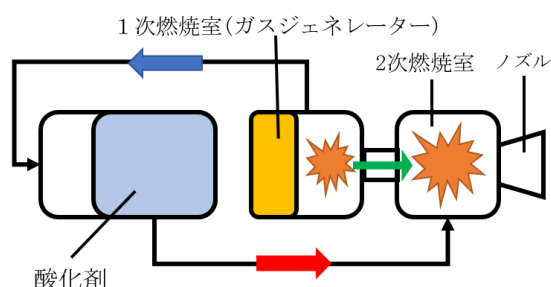


図1 ガスハイブリッドロケットの構造

ガスハイブリッドロケットは燃焼室を2つ有するため構造重量が増加する特徴を有する。しかし、2次燃焼室ではガス化した燃料とガス化した酸化剤によって燃焼するため特性排気速度効率(ηC^*)が高い特徴を有する⁽¹⁾。

本研究では、人工衛星に搭載する推進系の開発が目標であるため、軽量かつ小型の推進系が望ましい。先行研究者の和田らは計量化かつ小型化を目的とし、ダイレクトインジェクションガスハイブリッドロケット (Direct Injection Gas Hybrid Rocket 以下 DIGHR) を提案した⁽²⁾。DIGHRの構造を以下に示す。

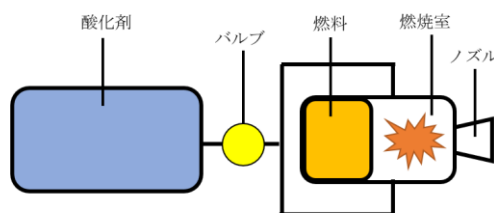


図2 DIGHRの構造

DIGHRは従来のガスハイブリッドロケットから2次燃焼室を取り去り、ガスジェネレータは燃焼室内に配置することで軽量化が図られた(図2)。

先行研究によってDIGHRの ηC^* は約74 [%]であることが分かっている。実用化されている固体・液体ロケットは ηC^* が95 [%]以上で運用されている点を考慮すると現状低い為、 ηC^* の改善が必要であると考えられる。

従って、本研究では、 C^* の改善を目指し、DIGHRにおける酸化剤をインジェクションする方法を従来

の方法から変更することによって ηC^* に及ぼす影響を調査する。

2. 特性排気速度効率

特性排気速度効率 ηC^* は、以下の式(1)によって算出される。

$$\eta C^* = \frac{C_{ex}^*}{C_{th}^*} \times 100 \quad (1)$$

式(1)の C_{ex}^* は実験によって決定される値である。また C_{th}^* は化学平衡計算プログラム NASA-CEA によって算出される値である。 C_{ex}^* を式(2)、 C_{th}^* を式(3)に示す。

$$C_{ex}^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}_{ox} + \dot{m}_f} \quad (2)$$

式(2)における P_c は燃焼室圧力、 A_t はノズルスロート断面積、 \dot{m}_{ox} は酸化剤質量流量、 \dot{m}_f は燃料質量流量とする。

$$C_{th}^* = \sqrt{\left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{R_0 T_c}{\gamma M_c}} \quad (3)$$

式(3)における γ は比熱比、 R_0 は普遍ガス定数、 T_c は断熱火炎温度、 M_c は燃焼生成ガスの平均分子量である。 C_{th}^* の値はノズルなどの値に依存せず燃焼器内部での推進剤の化学反応過程に依存する値であり、推進剤の評価に用いられる。 ηC^* は式(1)より C_{th}^* と C_{ex}^* の比であり、理論値と比較してどれだけ性能を出しているかを示しており、燃焼の完結性を示す値である。 ηC^* が低い場合、燃焼ガスの化学反応が完全に行われず不完全燃焼の状態では排出されている可能性を示す。

3. 燃料及び酸化剤

燃料には自己発熱分解反応を有するグリシジルアジドポリマ(Glycidyl Azide Polymer 以下 GAP)を使用した。GAPは分子構造中にアジド基を有しており、アジド基が脱離する際にエネルギーを発生する。発生したエネルギーが次のアジド基の脱離を促進させるため連鎖的な反応を行う。以上の反応を自己発熱分解反応と呼ぶ。自己発熱分解反応は雰囲気圧力が7気圧以上の際に発生する。自己発熱分解反応中に雰囲気圧力が7気圧以下になることで自己発熱分解反応を停止するため、DIGHRの燃料に使用した際、燃焼室圧力を7気圧以下とすることで強制的に停止させることが可能で、その後、再着火も可能である。GAPは分子構造中のヒドロキシ基(-OH)の数によって分類される。また、GAPは分子構造中に酸素原子を含む。従って、最適O/Fが低い傾向になるため、

必要とする酸化剤が少ないので推進系の更なる小型化が可能といった利点を有する。本研究で使用したGAPは分子構造中に4つアジド基を有する Tetra-ol GAPを使用した(図3)。



図3 実験で使用した Tetra-ol GAP

酸化剤には N_2O を使用した。 N_2O は常温で高い飽和蒸気圧を有する圧縮性流体である。従って、酸化剤に使用した際加圧機構が不要になり N_2O 自身の圧力を用いて燃焼器へ供給することが可能である。

4. 実験方法

燃料は燃焼表面積が時間経過によって変化せず、一定の推力を維持することが可能である端面燃焼方式で実施した。酸化剤は亜酸化窒素自身の圧力を利用して燃焼室へ供給するブローダウン方式を採用した。

実験では酸化剤のインジェクション方法を異なる2方法実施する。1つ目は従来のインジェクション方法である燃料に対して直角にインジェクションする方法、2つ目は酸化剤に旋回流を付与しインジェクションする方法を実施する。以下、図4に酸化剤のインジェクション方法を示す。2つのインジェクション方法における特性排気速度効率を比較する。

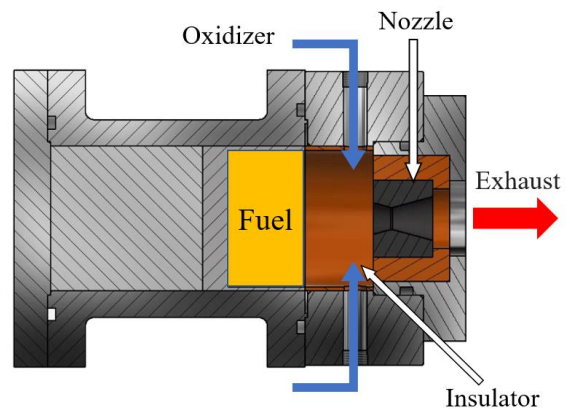


図4 (a) 従来型インジェクション

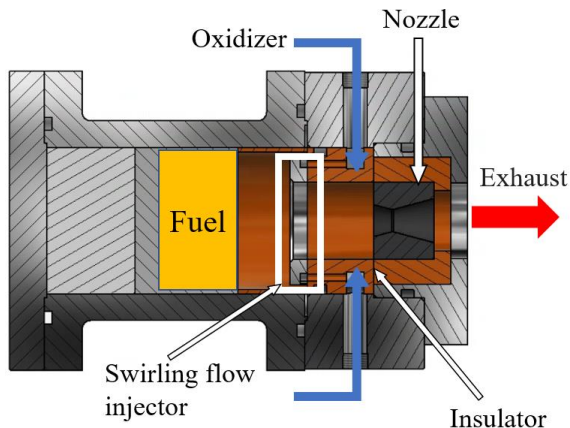


図4 (b) 旋回流インジェクション

以下、図5に旋回流インジェクションで使用した酸化剤旋回流インジェクタの概略図を示す。

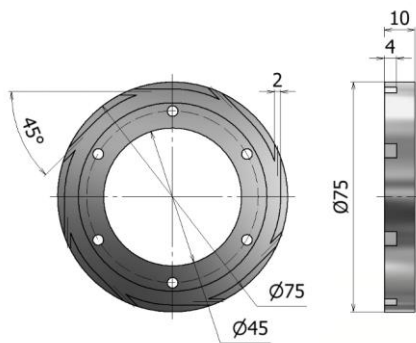


図5 旋回流インジェクタの概要

5. 実験条件

以下、表1に実験条件を示す。

表1 実験条件

酸化剤/燃料	N ₂ O/GAP
理論特性排気速度 (m/s)	1609
燃焼時間 (s)	3.0
燃焼室圧力 (MPa)	2.5
O/F	2.2

実験で使用する圧力計，ロードセルはすべて校正試験を行い計測する。

DIGHRにおいて燃焼室特性長さ(L*)と特性排気速度効率の関係については不明なため，実験におけるL*は一致させる。

6. 実験結果

従来型インジェクションにおいて実験は1回実施した。旋回流インジェクションにおいて実験は3回実施した。

実験で得られたグラフを以下，図6，及び図7に示す。図6は従来型インジェクションの時間履歴を示し，図7は旋回流インジェクションの1回目の時間履歴を示す。

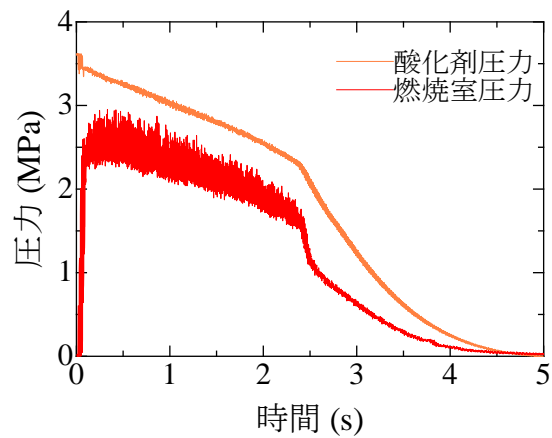


図6 従来型インジェクションの時間履歴

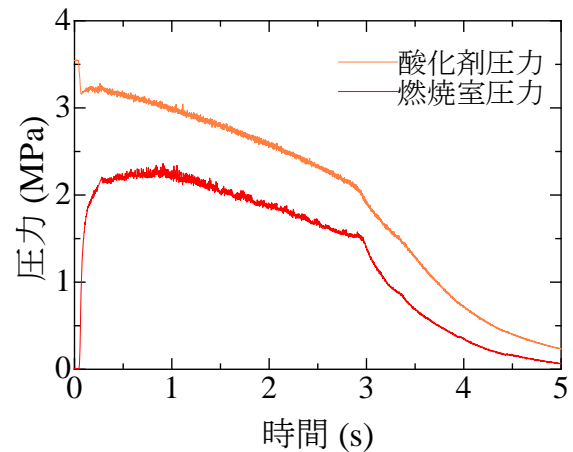


図7 旋回流インジェクションの時間履歴

図6及び図7に示すように燃焼室圧力の急激な上昇など確認できず，酸化剤圧力の低下と共に燃焼室圧力が低下していることから正常燃焼をしたと判断した。以下表2に各実験における実験結果を示す。

表2 実験結果の比較

	従来型インジェクション	旋回流インジェクション
燃焼時間 (s)	2.40	2.91
燃焼圧力 (MPa)	2.08	1.96
O/F	2.7	1.46
特性排気速度 (m/s)	1187	1368
トータルインパルス (N s)	713	986
GG 燃焼速度 (mm/s)	9.74	11.92
ηC^* (%)	74.0	80.5

燃料に対して従来型インジェクションは ηC^* が 74.0 [%]であった。対して、旋回流インジェクションでは ηC^* が 80.5 [%]であった。

7. 考察

表 2 より、酸化剤に旋回流を付与することで ηC^* が約 6 [%]向上した。従って、DIGHR において、酸化剤に旋回流を付与することで ηC^* が向上することが分かった。

酸化剤に旋回流を付与したことで ηC^* が上昇した要因として、酸化剤と燃料の混合が促進したことが考えられる。図 4(a)に示すように、従来型インジェクション方法では、酸化剤をノズル付近の酸化剤供給ポートから供給していた。このことから、酸化剤の一部が燃焼反応を行う以前にノズルから排出されていると考えられる。対して、旋回流インジェクション方法では酸化剤が燃料付近まで到達していると考えられる。酸化剤が燃料付近まで到達し燃料と混合、燃焼することによって、従来型インジェクション方式と比較し特性排気速度効率が向上したと推測する。

ガスジェネレータの燃焼速度は予め、ストランドバーナー試験を実施することで燃焼速度を予測し DIGHR の実験を実施している。以下式(4)で示す式がストランドバーナー試験で得られた燃焼速度式である。

$$\dot{r}_b = 6.57P_c^{0.61} \quad (4)$$

上記式(4)における P_c [MPa]とは燃焼室圧力である。上記式(4)における燃焼速度と、燃焼実験で得られた燃焼速度を以下、表 3 及び図 8 に示す。

表 3 燃焼速度比較

	従来型インジェクション	旋回流インジェクション
ストランド試験での燃焼速度 (mm/s)	10.27	9.90
DIGHR での GG 燃焼速度 (mm/s)	9.74	11.92

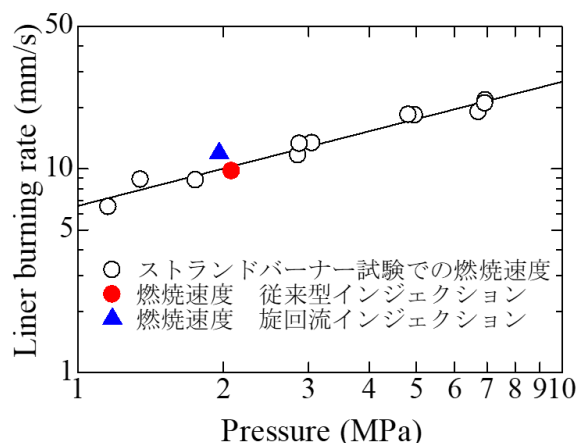


図 8 燃焼速度の比較

従来型インジェクションの実験では燃焼速度には大きな差異は確認できず、ストランドバーナー試験の燃焼速度とおおよそ一致した。旋回流インジェクションの実験では燃焼速度が約 2 [mm/s]上昇した。これは旋回流または燃料方向への酸化剤の噴射が燃焼火炎を燃料側に漸近させ、燃料表面への熱の流入量が増加し GAP の燃焼速度が増加した可能性が考えられる。

8. 結言

本研究によって DIGHR において酸化剤に旋回流を付与することで ηC^* が上昇することを明らかにした。酸化剤に旋回流を付与し、燃料側へ噴射させたことで、GAP ガスジェネレータの燃焼速度が増加した。

参考文献

- 1) 和田 豊, GAP の燃焼に関する研究 燃焼機構の解明とガスハイブリッドロケットへの応用, 2018 年総合研究大学院大学博士論文, P74, (2018)
- 2) Wada, Y, Hatano, S, Banno, A, Kawabata, Y, Baba, K, Hasegawa, H, and Hori, K, Design and development of direct-injection gas-hybrid rocket using glycidyl azide polymer for small satellite thruster, EUCASS, (2019)