

K-39

ハイブリッドロケットエンジンの固体燃料形状による燃焼性能の向上に関する研究 Study on Improvement of Combustion Performance of Hybrid Rocket Engine with Solid Fuel Shape

前田豊徳¹, ○陳奕潼¹, 皆川瞬汰朗¹, 小林泰成², 高橋晶世³, 坂野文菜³, 高橋賢一³
Hironori Maeda¹, *Chen YiTong¹, Shuntaro Minagawa¹, Taisei Kobayashi²,
Akiyo Takahashi³, Ayana Banno, Kenichi Takahashi³

Abstract: Hybrid rocket engines have the disadvantage of a low regression rate compared to chemical rockets. One of the solutions is to add some kind metal powder to the fuel. In this study, we tried to extend the residence time of the additives by using a backward step flow for efficient ignition and combustion of the additives. We used a 2D visualization engine to investigate the vortex formation generated on the solid fuel with a downward step. A smoke generator was used to observe the flow. As a result, vortices formation was confirmed with eddy drifts.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットエンジンは化学推進ロケットの一種であり、主に液体の酸化剤と固体の燃料を用いて推進するものをいう。燃焼は固体燃料表面を酸化剤が流れることで形成される境界層内で行なわれる。火炎からの熱放射もしくは溶融した燃料からの熱伝導により固体燃料の溶融・気化が進み、燃料と酸化剤が混合することで拡散火炎を形成する。ハイブリッドロケットエンジンには、現在実用されている化学推進ロケットに比べて燃料後退速度や燃焼効率の低さが課題となっている。この課題に対して、燃焼熱が大きい物質を固体燃料に添加し、添加物の燃焼によって火炎から固体燃料への熱流束を大きくし、燃料後退速度を高くする試みが進められている^[1]。

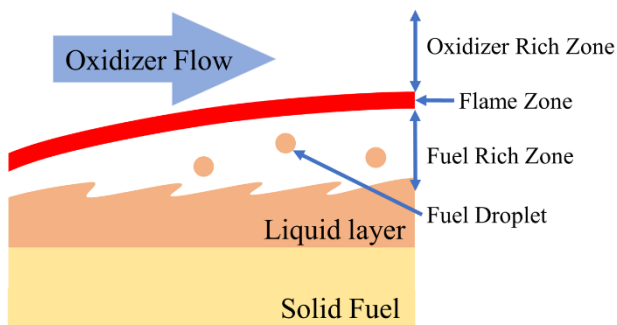


Figure 1. Boundary Layer Combustion

本研究室では、固体燃料に金属粉末を添加することにより燃料後退速度の向上を図っている。先行研究から、マグナリウム (Mg-Al) の添加による燃料後退速度の改善が認められている。しかし一部の Mg-Al 粉末が未燃の状態でもノズルから排出されることが目視で確認されている。そのため、本研究では固体燃料に添加された金属粉末の着火割合を向上させることを目的として、燃料表面に渦を発生させることで、Mg-Al

粉末の滞留時間を延ばすことを考えた。渦を作るために、燃料表面に段差を設けた。今回の実験では、段差による渦生成の効果を確認するため、2次元可視化装置を用いて固体燃料表面の流れを観察した。

2. 実験装置と方法

① 実験試料

固体燃料にマイクロクリスタリンワックス (WAX) 100%を用い、Figure 2のような形状で製作した。固体燃料の成型は溶融させた WAX 燃料を PLA 樹脂型に流し込み、自然冷却させ固まったのちに側面を 26 mm の幅に合わせて垂直に成型した。実験に用いた WAX の諸元を Table 1 に示す。

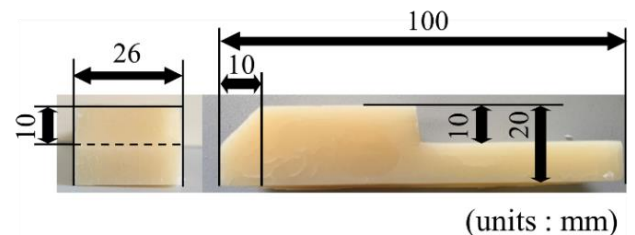


Figure 2. Solid Fuel of 2D Visualization Engine

Table 1. Properties of the Microcrystalline-wax

Supplier	NIPPON SEIRO CO., LTD.
Trade name	Hi-Mic-2095
Density	780 kg/m ³ (120 °C)
Melting point	374 K (101 °C)
Flash point	583 K (310 °C)

② 2次元可視化装置を用いたコールド試験

実験装置の概略図および2次元可視化装置の概略図をそれぞれFigure 3およびFigure 4に示す。フォグマシン（株）サウンドハウス、SM1200II）から噴き出た煙と空気を混合させ送風機で加速し、上流部から流入させ、流れの様子を撮影し解析した。観測窓は内側が5 mm、外側が8 mmの亚克力板の2層構造となっている。

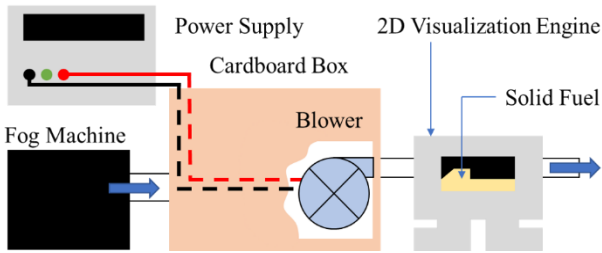


Figure 3. Schematic of the experimental apparatus

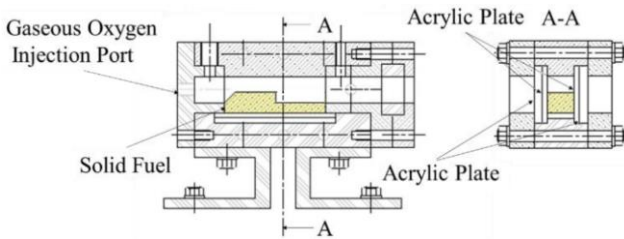


Figure 4. 2D Visualization Engine

3. 実験結果および考察

電源装置の電圧を変え、計5種類の条件で実験を行った。まず、実験前に送風機で加速させた風速を風速計（株）MonotaRO、簡易デジタル風速計）により直接計測した。実験条件をTable 2に示す。また、固体燃料まわりの流れを可視化した実験画像をFigure 5に示す。

Table 2. Experimental conditions

Voltage, V	Current, A	Velocity, m/s
3.4	0.09	3.0
5.0	0.14	2.1
8.0	0.21	4.1
10.0	0.26	5.8
12.0	0.31	6.2

Figure 5より固体燃料の段差角部から振動し、剥離していることが確認できた。また、段差直後の下流側の剥離領域では逆流が生じており、渦が確認できた。このことから段差角部を剥離点として主流と剥離領域の流速差によるせん断流れが生じていると考えら

れる^{[2][3]}。この流れによって剥離点より後方に伸びる混合層^[3]のような乱流領域ができており、段差後流に渦ができたと考えられる。

また、Figure 5より剥離領域は約35 mmであることが確認できた。後流渦は平均速度や乱れの分布が相似になる^[2]ため、段差の大きさを変えても、同様な剥離領域が形成され渦が発生すると考えられる。このことより、剥離領域に発生する渦によって燃焼ガスの滞留時間が延びると考えられる。

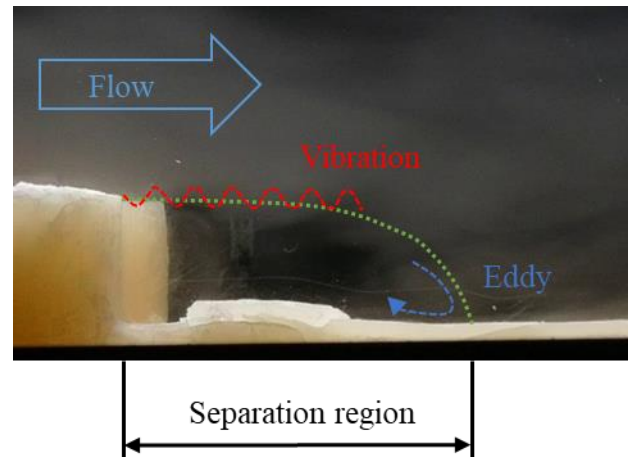


Figure 5. The Appearance of Flow

4. 結論と今後の課題

今回の実験では、固体燃料の段差による渦生成の有無の確認を目的として、2次元可視化装置を用いてコールド試験を実施した。その結果、画像解析により段差部分に渦が確認できた。今後は2次元可視化装置での燃焼試験を行い、画像解析および燃焼前後での燃料形状の変化から、燃焼時においてもコールド試験と同様の渦が発生するかを観察する予定である。

また、燃焼後の残渣解析を行なうことで、燃料に設けた段差により金属粉末の燃焼効率に変化が生じるかを検証する予定である。

5. 参考文献

- [1] 羽生 宏人：「マグナリウムの固体ロケット推進薬への転用」、軽金属、第58巻、第4号、pp.162-166、2008年
- [2] 佐々木恭介：「斜めステップ流れの特性に関する実験的研究」、岐阜大学機関リポジトリ博士論文、2005年
- [3] 木谷勝：「自由境界層・自由せん断乱流」、ながれ、第15巻、pp.66、1996年