

## K2-44

## ダクテッドロケットにおけるマグナリウム粒子径による燃焼速度の影響

The influence of burning rate due to a particle diameter of magnalium in ducted rockets

石橋勇人<sup>1</sup>, ◯根岸尚史<sup>1</sup>, 桑原卓雄<sup>2</sup>Hayato Ishibashi<sup>1</sup>, Naofumi Negishi<sup>1</sup>, Takuo Kuwahara<sup>2</sup>

Abstract: Ducted rockets are one kind of ramjet engines. Ducted rockets can improve a specific impulse by adding a material of high combustion heat with oxygen in the gas generator. Therefore adding boron (B) which has high density, high combustion heat with oxygen is considered. However, B forms boron trioxide and cannot finish burning in the secondary combustor. To solve these problems, we added magnalium (Mg-Al). It has low melting point and high adiabatic flame temperature. We focused on the particle diameter of Mg-Al, because surface area and particle number depend on particle diameter. We sifted and separated it. As a result, burning rate is fast if particle diameter of Mg-Al is small below 1 MPa.

## 1. 研究背景

ラムジェットエンジンは、流入するラム空気を回転式圧縮機を用いずに、空気の持つ運動量を直接的に圧力に変換するジェットエンジンである。ラムジェットエンジンの1つであるダクテッドロケットはガスジェネレーター、大気より空気を吸入するための空気取入口、可燃性ガスを発生する一次燃焼器、可燃性ガスと空気を混合して燃焼させる二次燃焼器、一次ノズル、二次ノズルで構成されている。Figure 1 にダクテッドロケットの概略図を示す。

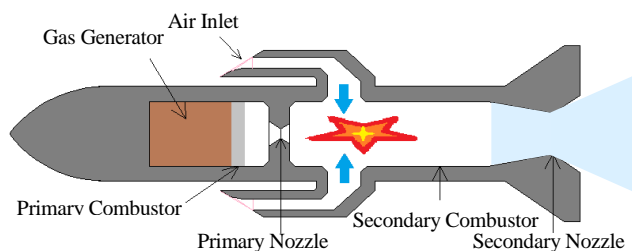


Figure 1. Fundamental structure of a ducted rocket

ダクテッドロケットは、ガスジェネレーターに酸素との燃焼熱が高い物質を添加することによって、比推力を向上させることが可能である。そこで、高密度で、酸素との燃焼熱が高いホウ素 (B) を添加することが考えられている。しかし、B は燃焼時に粒子表面に酸化膜が形成されるため着火が困難であり、また、燃焼時間が長い二次燃焼器内で燃えきらないという問題がある。この問題を解決するため、融点が低く、断熱火炎温度が高い、マグナリウム (Mg-Al) を B 含有のガ

スジェネレーターへ添加することが考えられている。Mg-Al の粒子径を変えることによって、組成比が同じでも Mg-Al 粒子数が変わるため、燃焼面積が変化し、B の燃焼に影響を与えると考え、Mg-Al の粒子径の変化に着目した。Mg-Al の粒子径を変化させたときにガスジェネレーターとして使用できるか評価する必要があり、本研究では Mg-Al の粒子径が燃焼速度にどう影響するか求めた。

## 2. 実験方法・実験装置

AP の割合変化による生成ガス組成を化学平衡計算ソフト NASA-CEA を使い、Figure 2 に示す。AP:HTPB の比が 70 : 30 のとき、可燃性ガスの生成量が多いことがわかる。また添加物質は粒子の影響を確認するためにそれぞれ 20 parts 加え、ガスジェネレーターの試料組成を決定した。試料の組成を Table 1 に示す。

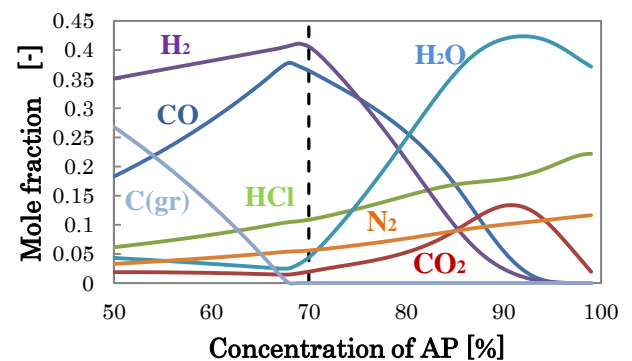


Figure 2. Mole fraction of combustion gas

**Table 1.** Composition of propellant [mass%]

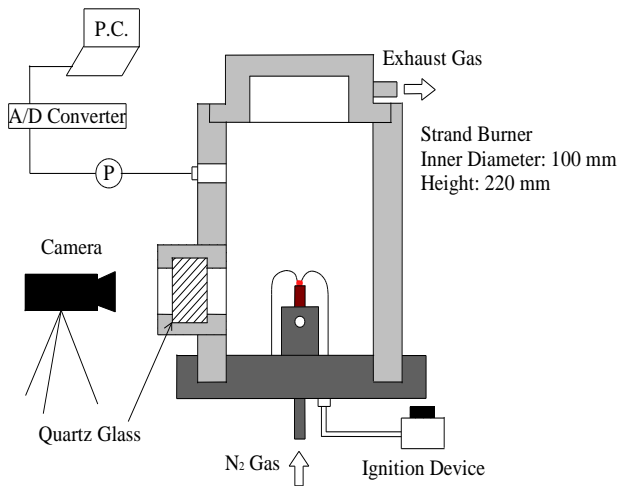
AP	HTPB	B	Mg-Al
50.0	21.4	14.3	14.3

組成比は変えずに、試料の Mg-Al の平均粒子径を Mg-Al 粒子を分粒することで変化させた。試料の Mg-Al の平均粒子径を Table 2 に示す。AP の粒径は 50 μm と 200 μm を 50:50, B は Grade 1 (粒径 1.0~1.5 μm)を用いた。

**Table 2.** Average particle diameter of magnalium

Sample name	Average particle diameter [μm]
Mg-Al_28	28
Mg-Al_56	56
Mg-Al_103	103

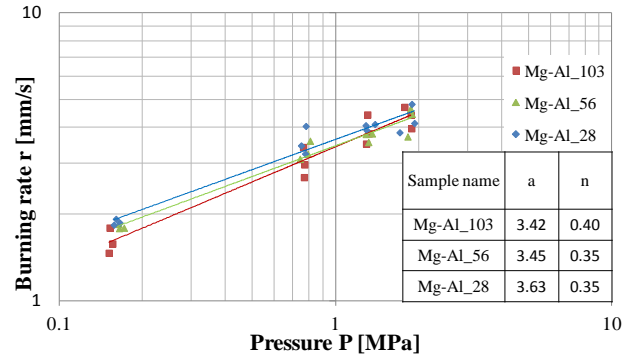
試料は直径 7 mm, 高さ 12 mm の円柱型に成型し、硬化させた。燃焼の様子をカメラ (600 fps)を用いて記録し、試料の 8 mm 間の燃焼時間を記録し、燃焼速度を求める。雰囲気は窒素置換し、圧力は 0.1, 0.6, 1.1, 1.6 MPa で行った。また、圧力センサーを用いて圧力履歴を取得した。実験装置を Figure 3 に示す。各試料・各圧力でそれぞれ 3 回ずつ測定した。



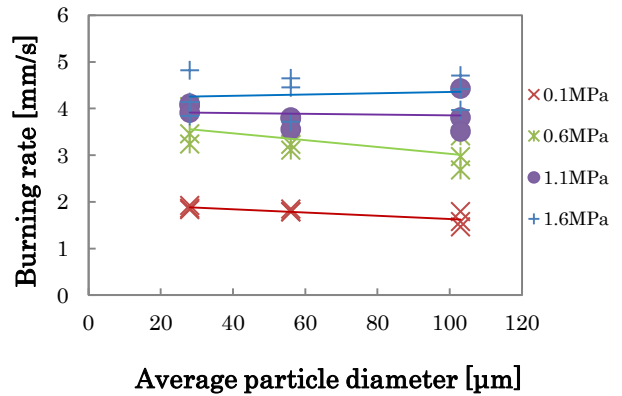
**Figure 3.** Experimental apparatus

### 3. 実験結果及び考察

燃焼速度  $r$  は圧力  $P$  を用いて  $r = aP^n$  で表される。ここで、 $a$  は定数、 $n$  は圧力指数であり、得られた各値および圧力と燃焼速度の関係を Figure 4 に示す。また、平均粒子径と燃焼速度の関係を Figure 5 に示す。



**Figure 4.** Relation between burning rate and pressure



**Figure 5.** Relation between burning rate and average particle diameter

Figure 4, 5 より、1MPa 以下では Mg-Al 粒子径が 28, 56, 103 μm の順で燃焼速度が速いことがわかる。Mg-Al は気相燃焼のため、熱量は燃焼面積に比例し、Mg-Al 粒子の単位体積あたりの断面積は Mg-Al 粒子径 28, 56, 103 μm の順に 0.054, 0.027, 0.015 μm<sup>-1</sup> になる。燃焼速度は試料の燃焼面の温度の関数でも表せられ、このような差がでたのは単位体積あたりの断面積の大きさに影響したためであると考えられる。

### 4. 結論

- ・圧力が 1 MPa 以下では Mg-Al 粒子径が小さいほど燃焼速度が速い。
- ・Figure 4 より Mg-Al の平均粒子径 28 μm, 56 μm, 103 μm を混合した試料の圧力指数が 1 より小さいため、ガスジェネレーターとして用いることが出来る。

### 参考文献

[1] 桑原 卓雄:「ロケットエンジン概論」, 産業図書, 2009.  
 [2] 久保田浪之介他:「プロペラント・ハンドブック」, 社団法人 火薬学会, 2005.