

K2-41

AP/HTPB 系コンポジット推進薬に含まれる Al 粒子の集塊特性

Agglomeration characteristics of aluminum particles in AP/HTPB composite propellants

○中垣信¹, 福永莉沙¹, 桑原卓雄²*Makoto Nakagaki¹, Risa Fukunaga¹, Takuo Kuwahara²

Abstract: Aluminum (Al) particles are used as metal fuels in composite propellants of solid rockets to improve the performance. However, Al particles agglomerate at the burning surface of composite propellants. Agglomerated Al particles cause low combustion efficiency. This study obtained about the relation between the concentration of Al particles and the agglomerated diameter. As a result, when the burning rate was constant, the agglomerated diameter remained unchanged by the concentration of Al particles.

1. 背景

固体ロケットとは、固体推進薬を燃焼させて推力を得るロケットである。固体推進薬には、主に結晶状の酸化剤と燃料成分であるバインダーを混合したコンポジット推進薬が用いられる。

固体ロケットの推進性能は、比推力で評価される。Al 粒子は燃焼熱が高く、ロケットの比推力を向上させるために添加するのが一般的である。

しかし、Al 粒子は推進薬の燃焼表面で蓄積・凝集し、初期粒径よりはるかに大きい集塊を形成する。集塊した粒子は、体積が増加し、燃焼時間が長くなる。このため、燃焼器内で燃焼完結に至らず、燃焼効率が低下し、ロケットの推進性能を十分に引き出せない。したがって、固体ロケットの推進性能の向上を考える上で、Al 粒子の集塊特性を得ることは重要である。

過去の研究で、燃焼速度は集塊に影響を及ぼす因子と考えられている。

本研究では、推進薬中における Al 粒子の添加量に着目する。まず Al 粒子の添加量と燃焼速度の関係を求め、次に Al 粒子の添加量の変化が集塊粒子径に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 理論

2.1 推進薬の選定

本研究では、酸化剤として過塩素酸アンモニウム (AP)、バインダーとして末端水酸基ポリブタジエン (HTPB)、金属粒子には Al を用いる。特徴を以下に示す。

(1) AP (NH_4ClO_4) (平均粒子径 50 [μm], 200 [μm])

酸素を多量に含有し、金属との燃焼性が良い。

(2) HTPB ($\text{C}_{7.075}\text{H}_{10.650}\text{O}_{0.233}\text{N}_{0.063}$)

製造性及び貯蔵性が良い。

(3) Al (平均粒径 30 [μm])

固体推進薬の燃焼性能向上用添加金属として用いられる。金属粒子の中で酸素との燃焼熱が高く、低コストで安全性が高い。

本実験での組成を Table 1 に示す。

Table 1. Composition of propellants [parts]

Sample name	AP	HTPB	Al
Al 0	92.5	7.5	0
Al 10	92.5	7.5	10
Al 20	92.5	7.5	20

2.2 燃焼速度

燃焼速度 r は以下の式を用いて算出する。

$$r = h/t \text{ [mm/s]} \quad (1)$$

h は推進薬の高さ、 t は燃焼時間である。ここで、 t はハイスピードカメラの映像より求める。

3. 実験方法及び実験装置

実験条件を Table 2 に示す。

Table 2. Experimental condition

Atmosphere gas	N_2
Initial temperature [K]	293
Pressure in chamber [MPa]	0.1

3.1 燃焼速度測定

Figure 1 に実験装置を示す。あらかじめ $\Phi 7 \text{ mm}$ の円

柱の推進薬の高さ h を測定し、ストランドバーナー内で燃焼させる。ハイスピードカメラを用いて推進薬の燃焼の様子を記録し燃焼時間 t を測定する。各組成について 3 回測定した。

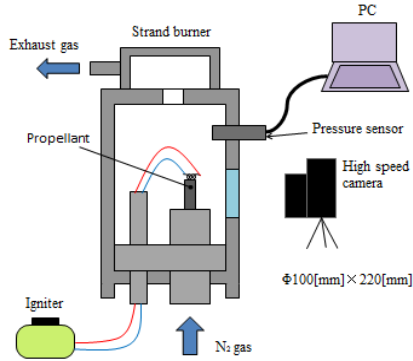


Figure 1. Experimental apparatus of the burning rate

3.2 燃焼表面観察

Figure 2 に実験装置を示す。顕微鏡に繋げたハイスピードカメラで $\Phi 10$ mm の半円柱の推進薬の燃焼表面を倍率 40 倍で撮影を行う。撮影した映像から燃焼表面における集塊粒子径を測定する。

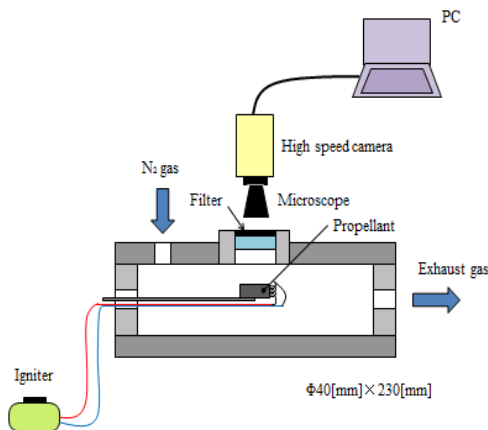


Figure 2. Experimental apparatus of the burning surface observation

4. 実験結果及び考察

Figure 3 に Al 粒子 0 parts, 10 parts, 20 parts の燃焼速度を示す。燃焼速度の平均値は、0 parts の時 0.94 mm/s, 10 parts のとき 0.96 mm/s, 20parts の時 0.89 mm/s であった。したがって、Al 粒子の添加量を変化させても燃焼速度はほぼ一定の値となった。

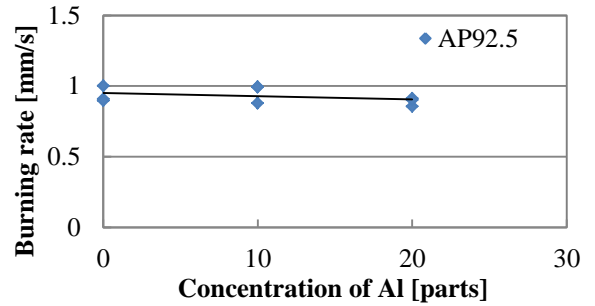


Figure 3. The relation of the concentration of Al and the burning rate

Figure 4 に Al 粒子の添加量と集塊粒子径の関係を示す。平均集塊粒子径は Al 10 の時は 214 μm , Al 20 の時は 201 μm で添加量による変化は殆どなかった。集塊粒子径は反応層厚さで決まる。^[3] 反応層厚さは燃焼速度に依存している。今回、燃焼速度がほぼ一定だったため、反応層厚さは変わらず平均集塊粒子径の変化が見られなかったと考えられる。

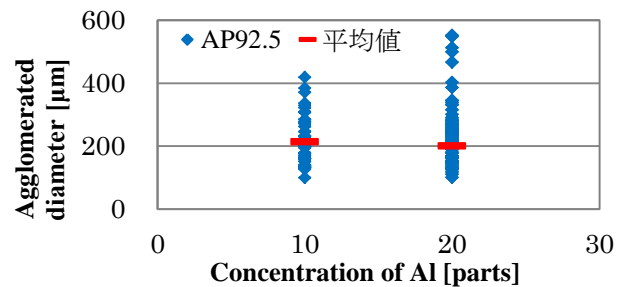


Figure 4. The relation between the concentration of Al and the agglomerated diameter

5. まとめ

- Al 粒子の添加量を変化させても燃焼速度はほぼ一定の値となった。
- 燃焼速度が一定の時、Al 粒子の添加量の変化による集塊粒子径の変化は見られなかった。

参考文献

- 羽生宏人, 「マグネリウム固体ロケット推進薬への適用」, 軽金属, 58 巻, 4 号, p.163, 2008.
- 生出翔, 「日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文」, 2013.
- K Takahashi, S Oide, and T Kuwahara, "Agglomeration Characteristics of Aluminum Particles in AP/AN Composite Propellants", Propellant Explos. Pyrotech. 38(4), pp.555-562, 2013.