

AP 系コンポジット推進薬における Al 粒子の集塊特性 Agglomeration characteristics of aluminum particles in AP composite propellant

生出 翔¹, ○奥村 悠¹, 桑原 卓雄²
Sho Oide¹, *Yu Okumura¹, Takuo Kuwahara²

Abstract: Aluminum (Al) particles are also known as additive for composite propellant that increase the combustion performance such as combustion temperature. However these Al particles cause low combustion efficiency when they agglomerate at burning surface. Then it is thought that interparticle distance of Al influences formation of agglomeration and so we obtain relation of agglomerate Al diameter at the burning surface to interparticle distance. As a result, when interparticle distance became half, agglomerate Al diameter doubled.

1. 背景

現在、固体ロケットでは主に結晶状の酸化剤と燃料を混合したコンポジット推進薬が用いられ、金属燃料としてアルミニウム (Al) 粒子を添加し燃焼温度を上げることで、推進薬の燃焼性能の向上を図っている。

この Al 粒子は推進薬の燃焼表面において凝集し、集塊を形成 (Agglomerate) することが知られている。燃焼表面において集塊が起こると、体積の増加に伴い、燃焼時間が長くなる。これにより燃焼室内において集塊した粒子は燃焼完結に至らず、燃焼効率の低下を招いてしまう。したがって、集塊特性を知ることは燃焼効率の向上を考える上で重要である。

そこで本研究では、推進薬中における Al 粒子同士の距離 (粒子間距離) に着目し、Al の粒子間距離が集塊形成に影響を与えていることを明らかにするため、Al 粒子の粒子間距離に対する集塊粒子径の関係を求めた。

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) と硝酸アンモニウム (AN)、バインダーとしてオクタデシルアルコール (Oct)、金属粒子には Al を用いる。AN 及び Oct については、燃焼速度を下げることで反応層を広げ、Al 粒子の挙動を観察し易くするために用いている。特徴は以下の通りである。

(1) AP (NH_4ClO_4) (平均粒径 50[μm])

酸素を多量に含有し、金属との燃焼性が良い。

(2) AN (NH_4NO_3)

酸素含有量が少ない。燃焼表面で液層となる。

(3) Oct ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{O}$)

融点が低く、燃焼表面で液層となる。

(4) 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。燃焼熱が大きく低コストで安全性が高い。本実験での組成を以下に示す

Table 1. Composition of propellant (parts)

Sample name	AP	AN	Oct	Al
Percentage	80	10	10	5,10,20

2-2. 粒子間距離の算出方法

Al の密度と添加量から推進薬の体積 V に占める Al の体積 V' を求める。さらに、 V を V' で割ることで、推進薬に占める Al 粒子の個数 N を求める。推進薬中に Al 粒子 1 個が占める体積 V/N を求め、その 3 乗根をとることで隣り合う粒子の中心から中心までの距離を求める。これから粒子径を差し引き、隣り合う粒子の表面から表面までの距離を粒子間距離と定義した。Table 2 に各添加量における粒子間距離を示す。

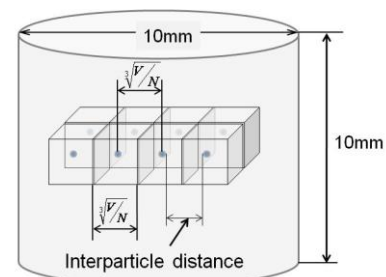


Figure 1. Interparticle distance

Table 2. Interparticle distance

Additive amount of Al [parts]	5	10	20
Interparticle distance [μm]	125	94	70

3. 実験方法

3. 1 実験装置

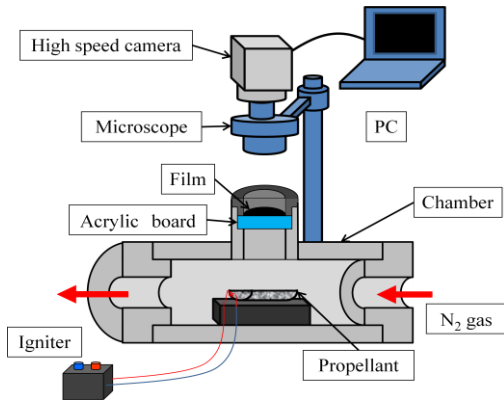


Figure 2. Experimental apparatus

Table 3. Experiment condition

Temperature in chamber	Common temperature
Pressure in chamber	Atmospheric pressure
Atmosphere gas	N ₂ atmosphere

Figure 2 に実験装置を示す。燃焼器内を大気圧、窒素雰囲気にし、顕微鏡に繋げた高速度カメラで推進薬の燃焼表面を倍率 40 倍で撮影を行う。この際、アクリル板の表面に感光させ現像した黒いフィルム取り付けることで燃焼表面の可視光を弱める。この方法で撮影した映像より集塊粒子径の測定を行った。

3. 2 解析方法

Figure 3 に撮影した集塊粒子を示す。集塊粒子径は着火をする直前の 1 個の粒子において 3 方向から測定し、50 個の平均値をとった。

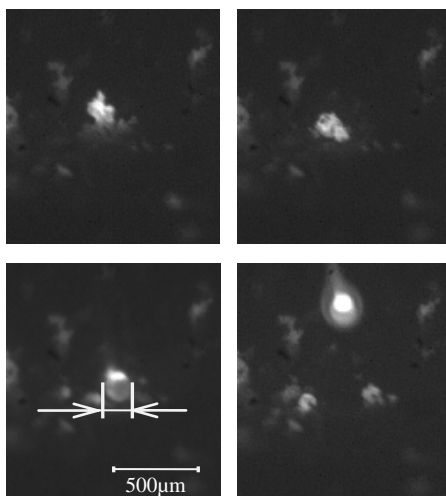


Figure 3. Agglomerated Al particle at burning surface

4. 実験結果及び考察

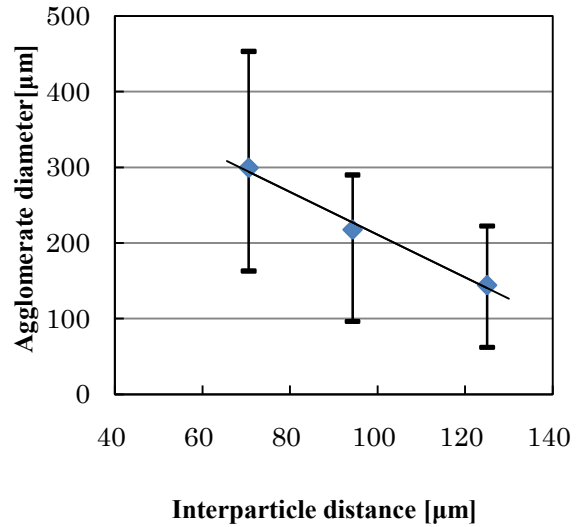


Figure 4. Agglomerate diameter

Table 4. Agglomerate diameter

Interparticle distance [µm]	125	94.3	70.5
Agglomerate diameter [µm]	144	218	299

Figure 4 に Al 粒子を 5 parts から 20 parts の集塊粒子径を示す。現状での測定結果では、粒子間距離 125[µm] で集塊粒子径は 144[µm], 94.3[µm] で 218[µm], 70.5[µm] で 299[µm] となり、粒子間距離が約半分になると、集塊粒子径は 2 倍の大きさとなり、粒子間距離に対して反比例の関係となった。

また、粒子間距離が小さくなると集塊粒子径の大きさのばらつきも大きくなっている。これは Al の添加量が変わり、燃焼速度が変化したことによるガス流の変化が影響したのではないかと考えられる。

5. まとめ

• Al 粒子径 30[µm]において、集塊粒子径は粒子間距離に対し反比例の関係となった。

6. 参考文献

[1]久保田浪之助他,「プロペラント・ハンドブック」, 山海堂, pp.280-285, 2005.
 [2]湯浅 三郎,「金属の着火と燃焼の特性」, 日本燃焼学会誌, 133 号, pp.152-163, 2003.
 [3]泉川 宗男他,「固体推進薬における金属の燃焼」, 航空宇宙技術研究報告, pp.1-2, 1988.