

レーザーを用いた固体推進薬燃焼表面の可視化

松本 幸太郎^{*1}, 岩崎 祥大^{*2}, 羽生 宏人^{*1}

Visualization of combustion surface of solid propellants using laser

Kotaro Matsumoto^{*1}, Akihiro Iwasaki^{*2}, Hiroto Habu^{*1}

ABSTRACT

The diameter of agglomerated Al particles is over 100 μm . To improve the performance of solid propellants, the method to control the agglomeration is required. In this study, combustion surface of solid propellants is visualized by high-speed camera using laser systems, in order to clarify the agglomeration mechanism of Aluminum (Al) particles. As a result, Al particles is collected around Ammonium Perchlorate (AP) particles at 1 MPa. Al particles that collected around AP particles formed the agglomerate at combustion surface and ignited as the agglomerated particle above combustion surface.

Keywords : Solid propellant, Aluminum, Agglomeration, Visualization, Laser

概要

多段式固体燃料ロケットの衛星輸送能力を増強させるためには、上段用固体推進薬の高性能化が最も有効である。さらに、固体燃料ロケットが潜在的に有する推進性能を十分に発揮させるためには、推進薬燃焼表面におけるアルミニウム(Al)粒子の集塊を抑制する必要がある。集塊 Al 粒子径の分布は主にサブミクロン、数 μm 、百～数百 μm の3つのピークを持つことが知られており¹⁾、100 μm 以上の集塊 Al 粒子を微粒化することが重要である。集塊 Al 粒子の微粒化を検討するためには、固体推進薬燃焼表面近傍における詳細な集塊過程の観察が必要である。本研究では、固体推進薬燃焼表面にレーザーを照射することで、固体推進薬燃焼表面近傍における Al 粒子集塊過程の可視化実験を行った。可視化実験より、1MPa 下の固体推進薬燃焼表面において、AP 粒子の周囲に Al 粒子が蓄積して Al 粒子塊となり、集塊 Al 粒子を形成することが得られた。

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-006/0010

^{*} 平成 28 年 11 月 24 日受付 (Received 24 November, 2016)

^{*1} 宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系
(Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

^{*2} 総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻
(The Graduate University for Advanced Studies, School of Physical Sciences, Space and Astronautical Science)

1. はじめに

固体ロケットの総合性能を評価する指標の一つが衛星輸送能力である。固体ロケットは科学探査衛星を宇宙空間へ投入するために、固体ロケットモータを計 3 段用いている。このような多段式固体ロケットによる衛星輸送能力増強に対して最も有効な手段は、上段固体ロケットモータ用固体推進薬の高性能化である。固体推進薬には、過塩素酸アンモニウム(AP)を主成分とした AP 系固体推進薬が用いられている。AP 系固体推進薬の主成分は、3 種類の粒径の異なる AP 粒子、Al 粒子、末端水酸基ポリブタジエン(HTPB)バインダである。固体推進薬の高性能化手法として、金属燃料である Al 粒子混合量を増大させることによる、密度比推力増加が有効である。

AP 系固体推進薬中には HTPB バインダに AP 粒子及び Al 粒子が不均一に分散する(Fig. 1)。Fig. 1 枠内に示すように、AP 粒子間に微小な Al 粒子が多量に含まれる。固体推進薬に含まれる Al 粒子は、推進薬燃焼表面において凝集・集塊し、数百 μm という非常に大きな集塊粒子となる。集塊した Al 粒子は燃焼室内

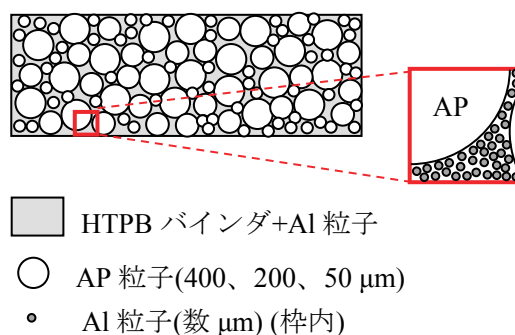


Fig. 1 固体推進薬中の粒子分散イメージ

で燃焼を完結出来ずにノズルから排出されるため、固体ロケットが潜在的に有する推進性能を発揮することが出来ない。よって、上段用固体ロケットモータの高性能化には、固体推進薬の高密度化及び集塊 Al 粒子の微粒化が必須である。

現状の集塊 Al 粒子に対する研究¹⁻⁵⁾は、観察の容易さから大きな Al 粒子(数十 μm)を用いて観察が行われている。また、低圧下(1 MPa 未満)での観察やそれに基づくモデル構築が多く、現実のロケット燃焼圧力下(5 MPa 以上)に対するアプローチは少ない。上段用高性能固体推進薬を開発するためには、実用レベルの固体推進薬組成を用いて、推進薬組成を決定する要因となる高圧燃焼下での Al 粒子の集塊過程を明らかにしなければならない。

本研究では、固体推進薬燃焼表面へレーザを照射することで、Al 粒子の集塊過程の可視化を行った。

2. 固体推進薬燃焼表面の可視化

2.1 実験方法

上段用高性能固体推進薬を開発するためには、実用レベルの固体推進薬組成を用いて、推進薬組成を決定する要因となる Al 粒子の集塊過程を明らかにしなければならない。将来の固体ロケットへの適用を目指すために、現行の固体ロケットに用いられている固体推進薬と同等の AP 系コンポジット推進薬組成(Table 1)を用いて研究を行う。酸化剤である AP は 400, 200, 50 μm の粒子を 60 : 15 : 25 wt%の割合で組み合わせた。金属粒子には、Al 粒子(平均粒子径 5 μm)を用いた。推進薬試験片には 2×5×5 mm (厚さ×横×高さ)の固体推進薬

を用いた。燃焼実験には、チムニ型ストランドバーナ(Fig. 2)を用いた。ストランドバーナ内は N_2 ガスで加圧し、燃焼圧力 0.1~1 MPa で実験を行った。レーザーは Cavitar Ltd.製 CAVILUX smart(スポット径:14 mm、出力: 400 W)を用いた。ハイスピードカメラには、Photron 製 FASTCAM MINI AX200 を用いた。撮影速度は5,000~40,000 fps で実験を行った。

Table 1 AP 系コンポジット推進薬組成.

| Sample | AP [wt%] | HTPB [wt%] | Al [wt%] |
|---------|-------------|---------------|-------------|
| Prop. 1 | 85 | 15 | 0 |
| Prop. 2 | 68 | 12 | 20 |



Fig. 2 実験系外観図

2.2 実験結果及び考察

2.1.1. 集塊 Al 粒子の燃焼

Fig. 3 に集塊 Al 粒子を可視化した結果を示す。可視化実験より、Al 粒子は固体推進薬燃焼表面で凝集した後に燃焼表面から離脱し、集塊し着火する様子が確認された。着火後の集塊 Al 粒子は回転を伴い燃焼を継続する。このとき、Fig. 3-③~⑥のように集塊 Al 粒子はアルミナキャップから微小なアルミナ粒子を周囲に飛散させていることが得られた。

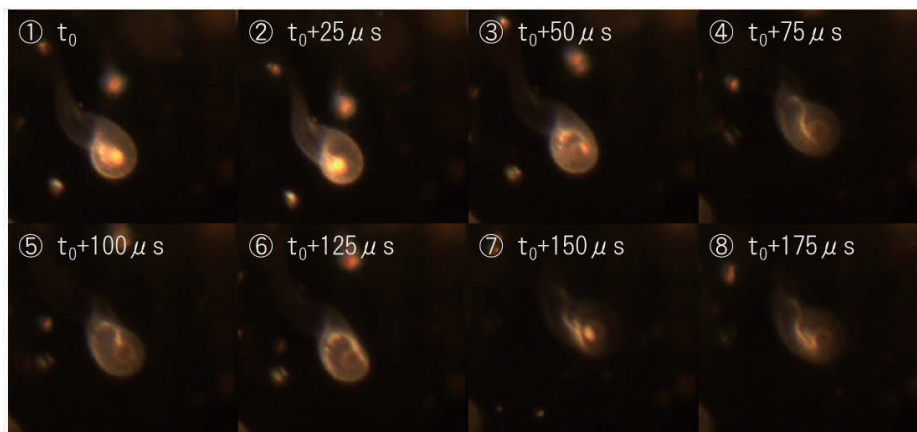


Fig. 3 集塊 Al 粒子の燃焼の様子

2.2.2 推進薬燃焼表面の可視化

Fig. 4 に Prop. 1 の燃焼表面の可視化結果を示す。Fig. 4-①より、0.1 MPa 下では AP 粒子周囲に HTPB バインダのものと思われる凝縮相が確認された。また、Fig. 4-②より、1 MPa 下においては、燃焼表面に露出する AP 粒子が凝縮相を形成して分解していることが得られた。このように、燃焼圧力が異なることで AP 粒子の分解の様子が異なることが得られた。

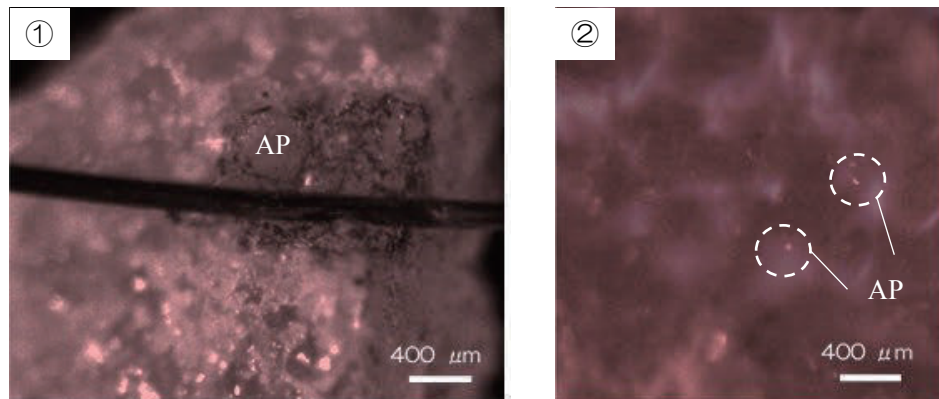


Fig. 4 Prop. 1 燃焼表面における AP 粒子挙動 (①: 0.1 MPa、②: 1 MPa, 倍率 4 倍)

Fig. 5 に Prop. 2 の燃焼表面可視化結果(燃焼表面強調)を示す。可視化実験結果より、レーザを用いることで燃焼表面の可視化と集塊 Al 粒子の同時観測が可能であることが得られた。Al 粒子を混合した固体推進薬の場合、AP 粒子の凝縮相は確認できなかった。また、AP 粒子が存在する箇所から集塊 Al 粒子が形成されることが確認された。このことから、AP 粒子と Al 粒子の集塊過程が関係していると考えられる。そこで、AP 粒子と Al 粒子の集塊の関係を求めるために、高倍率での可視化を行った。Fig. 6 に倍率 11 倍における Prop. 2 の燃焼表面可視化結果を示す。

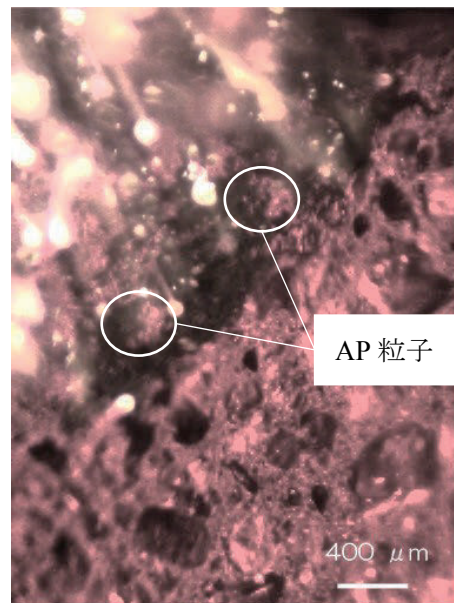


Fig. 5 Prop. 2 燃焼表面の可視化 (@1 MPa, 倍率 4 倍)

Fig. 6 より、固体推進薬燃焼表面上では、AP 粒子の凝縮相周囲に Al 粒子が蓄積し、蓄積した Al 粒子の塊が集塊 Al 粒子となることが得られた。

集塊過程としては、① AP 粒子が燃焼表面に露出する。② 露出した AP 粒子周囲に Al 粒子が蓄積する。このとき、AP 粒子上部より、AP 分解ガスが噴出口より噴出する様子が得られた。③ AP 粒子に蓄積し続けた Al 粒子が Al 粒子塊となり、燃焼表面から剥離する。④ 剥離した Al 粒子塊が燃焼表面より離脱し、集塊後着火する。AP 粒子に蓄積した後に集塊した集塊 Al 粒子径は約 120 μm となった。以上より、固体推進薬の高性能化のためには、AP

粒子に蓄積する集塊過程によって生じる集塊 Al 粒子の微粒化手法の検討が必要である。

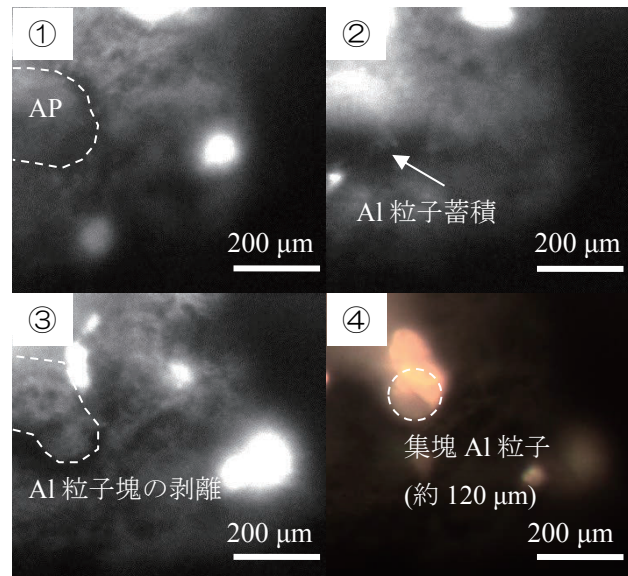


Fig.6 AP 凝縮相への Al 粒子蓄積(@1 MPa, 倍率 11 倍)

3. まとめ

固体推進薬燃焼表面を観察するために、レーザを用いた可視化実験を行った。可視化実験の結果、AP 粒子の分解挙動は燃焼圧力によって異なり、1 MPa 下では凝縮相を形成して分解することが得られた。Al 粒子の集塊過程として、AP 粒子の凝縮相の周囲に Al 粒子が蓄積することで集塊 Al 粒子となる過程が観察された。固体推進薬高性能化のためには、AP 粒子周囲への Al 粒子蓄積を考慮した集塊 Al 粒子の微粒化手法の検討が必要である。

参考文献

- 1) V. E. Zarko, and O. G. Glotov, Formation of Al oxide particles in combustion aluminized condensed systems, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 74, No. 6 (2013), pp. 139-143.
- 2) G. Glotov, and V. A. Zhukov, Evolution of 100- μm Aluminum Agglomerates and Initially Continuous Aluminum Particles in the Flame of a Model Solid Propellant. I. Experimental Approach, Combustion, Explosion, and Shok Waves, Vol. 44, No. 6 (2008), pp. 662-670.
- 3) F. Maggi, and L. T. DeLuca, Pocket Model for Aluminum Agglomeration Based on Propellant Microstructure, AIAA Journal (2010).
- 4) N. S. Cohen, A Pocket Model for Aluminum Agglomeration in Composite Propellants< AIAA Journal, Vol. 21, No. 5 (1983), pp. 720-728.
- 5) J. C. Mullen, and M. Q. Brewster, Reduced Agglomeration of Aluminum in Wide-Distribution Composite Propellants, Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 3 (2011), pp.650-661.