

K-35

## ハイブリッドロケットエンジンの固体燃料の安全評価についての研究 大気雰囲気下における固体燃料の粉塵化

### Study on the Safety Evaluation of Solid Fuel for Hybrid Rocket Engines Dusting of Solid Fuel in the Air

蘇紀任<sup>1</sup>, 古屋遥香<sup>1</sup>, 前川駿太<sup>1</sup>, 松崎真香<sup>1</sup>, 〇森大翔<sup>1</sup>, 高橋晶世<sup>2</sup>, 坂野文菜<sup>2</sup>, 高橋賢一<sup>2</sup>  
Chi-Jen Su<sup>1</sup>, Haruka Furuya<sup>1</sup>, Shunta Maekawa<sup>1</sup>, Manaka Matsuzaki<sup>1</sup>, \*Hiroto Mori<sup>1</sup>,  
Akiyo Takahashi<sup>2</sup>, Ayana Banno<sup>2</sup>, Kenichi Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: For the purpose of safety evaluation of hybrid rocket propellant, fragmentation tests of solid fuel containing graphite were conducted and particle size distribution was obtained. As a result of comparison with the particle size distribution of only HTPB, dusting was suppressed. It is possible that the fuel with HTPB and graphite, which is considered to be the same performance, has the same safety risk.

#### 1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンは化学ロケットエンジンに分類され、一般的に固体の燃料および液体あるいは気体の酸化剤を推進剤として推力を得るロケットエンジンである。燃料と酸化剤が別々に充填されており、燃焼室で気化・混合される仕組みである。そのメリットは、酸化剤の供給量を調整することで推力の制御が可能であることに加え、再着火も可能なことである。また、不活性燃料を採用し、かつ燃料と酸化剤の相が異なることにより高い安全性が確保されるため、製造コスト、運搬コストの削減に繋がる。それに対して、課題として残っているのが低燃料後退速度と低燃焼効率である。これらにより、ハイブリッドロケットエンジンは人工衛星の打ち上げ運用には至っていないが、弾道飛行を行う宇宙機の推進系に採用されたことにより、実用化の機運が高まっている<sup>[1]</sup>。しかし我が国では、ハイブリッドロケットエンジンの打ち上げの際に必要な安全評価基準が定まっていない。安全性が高いとされるが、事故発生時の衝撃等により、固体燃料が粉塵化する可能性がある。粉塵が発生すると、酸化剤と混合して急速な燃焼を引き起こす。そのため、ハイブリッドロケットエンジンの安全性には固体燃料の粉塵化が大きく関わってくる。傾向として、燃料にかかるエネルギーが高く、燃料の靱性が低く、燃料の体積が小さいほど粉塵は発生しやすい<sup>[2]</sup>。昨年度当研究室が実施した実験では、固体燃料の材質に末端水酸基ポリブタジエン（以降 HTPB）単体を用いて同様の傾向が確認された。一般的に、HTPB をハイブリッドロケットエンジンの燃料とする際にはカーボンブラックの粉末が混和される。固体燃料を黒色にすることにより、

燃料内部での放射熱の吸収性を防止するためである<sup>[3]</sup>。また HTPB ではないが、ワックスにカーボンブラック粉末を混和することで、機械物性が向上することがわかっている<sup>[4]</sup>。そこで今年度は、その一種であるグラファイト粉末を HTPB に混和して供試体の製造性を確認し、破碎試験を実施して前述の傾向に合致しているかを調べ、粉塵発生のしやすさについて評価を行う。

#### 2. 実験方法

##### 2.1. 固体燃料作製

破碎試験に使用した供試体は防衛大学にて製作した。主成分である HTPB の諸元を下記の Table 1 に示す。グラファイト粉末（和光純薬工業、LTE1562）とイソホロンジイソシアネート（東京化成、I0314）（以降 IPDI）を混和し、60℃にて加熱して硬化させた。HTPB に対し IPDI は外割 8%、HTPB + IPDI に対しグラファイトは外割 3.2%とした。

Table 1. HTPB Specifications

Trade name	Poly bd R-45HT
Supplier	Idemitsu Kosan Co., Ltd.
Boiling point	300 °C
Flash point	298 °C
Density	906 kg/m <sup>3</sup>

##### 2.2. 固体燃料破碎試験

固体燃料破碎試験は防衛大学火薬類実験施設の爆発ピットにて計 6 回実施した。供試体のサイズは φ30×30（外径 30 mm，全長 30 mm），φ50×50（外径 50

1：日大理工・学部・航宇 2：日大理工・教員・航宇

mm, 全長 50 mm) とし, 各 3 回実施した. 供試体の端面中央の孔に雷管を挿入し, 上から油粘土で固定した. また, 試験時の供試体の位置は供試体底面が床から 1 m と定め, ピット内の梁の間にひもを渡し, 供試体を雷管のコードで吊り下げた. Figure 1 に爆薬ピットでの破碎実験の概略図を示す. 瞬間電気雷管(北海道日油株式会社, HNM-JD-001)で供試体を破碎し, ピット内に落下した破片を回収した. 破碎後の供試体の回収目標は, 供試体質量の 98% とした.

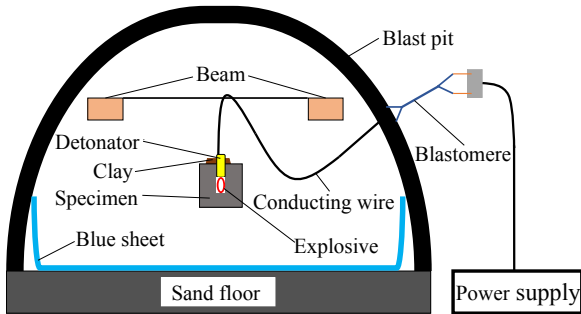
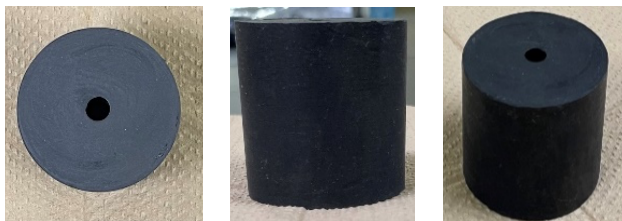


Figure 1. Schematic Diagram of Equipment for Fuel Fragmentation tests



Top view Side view Overall view

Figure 2. Specimen (φ 50 × 50)

### 2. 3. 粒度分布測定

固体燃料破碎試験にて回収した供試体の破片は, 水平旋回ふるい (アズワン, SKH-01) にて JISZ8815: 1994 に基づきふるいかけを行った. ふるい目開きは 9500, 3350, 850, 500, 212, 53 μm を使用し, 回転速度 210 rpm を 10 分間保持した. 目開きごとにふるい上の破片の質量を電子天秤 (A&D, HR-120) で計測を行った.

### 3. 実験結果及び考察

グラファイト粉末を混和した供試体は, どのサイズも問題なく硬化した.

今年度と昨年度の HTPB 粒度分布を Figure 3 に示す. 図中に HTPB+Gr と示すのが今年度, HTPB alone と示すのが昨年度の結果である. なお, グラフは各条件 3 回の平均値である.

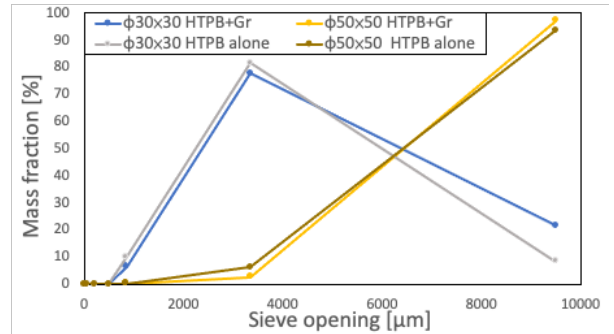


Figure 3. Particle Size Distribution

Figure 3 より, HTPB はグラファイト粉末の有無による粒度分布の変化はほぼ見られないことがわかった. グラファイトの有無で機械物性があまり変化しなかった可能性がある. これは, カーボンブラックとグラファイトとの構造の違いが影響していることが考えられるが, さらなる検討が必要である. 以上より, グラファイトを混和させても粉塵化にはほぼ影響がないと推測できる.

### 4. 結論と今後の課題

グラファイト粉末を HTPB に混ぜて供試体を作製した. 破碎試験の結果は HTPB のみの供試体と大きな差は見られず, グラファイト粉末の有無による粉塵化への影響は確認されなかった. 今後は供試体作成時に作成した衝撃試験片を用いて, アナログ式シャルピー衝撃試験機 (安田精機製作所, No.258) で衝撃試験を行い, 供試体の靱性を取得する. 粒度分布や靱性データを用いて燃料破碎モデルを作成する.

### 5. 参考文献

- [1] Chiaverini, M. J., and Kuo, K. K. : "Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion", Vo.218 Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, DC, 2007, Chaps.1, 2, and so on.
- [2] Takahashi, A., Kitagawa, K., and Shimada, T. : "Evaluation of Safety Distance for Blast of Hybrid Rocket Propellants", AIAA 2019-3197, 2019, pp.1-26.
- [3] Grefen, B., Becker, J., Linke, S., and Stoll, E. : "Design, Production and Evaluation of 3D-Printed Mold Geometries for a Hybrid Rocket Engine", 2021, pp.1-4.
- [4] Fernandes, P. C. G., Gomes J. S., Kawachi, E. Y., Nagamachi, M. Y., de Araujo Ferrão, L. Y., Cardoso, K. P. : "Exploring the Mechanical, Thermal and Ballistic Effects of Carbon Black on Paraffin-Based Fuels for Hybrid Rocket Motors", 2019, P.21.