

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

金指和¹, 齋藤亮¹, 〇結城秀仁¹, 高橋晶世², 高橋賢一²
 Nodoka Kanasashi¹, Ryo Saito¹, *Hidehito Yuki¹, Akiyo Takahashi², Kenichi Takahashi²

For the purpose of contributing to the safety evaluation of hybrid rocket propellants, fragmentation tests of solid fuels were conducted and the particle size distributions of the debris were obtained. As a result of comparing the particle size distribution, it is found that microcrystalline wax, which is a relatively brittle material, generates dust more easily than terminal hydroxylated polybutadiene. It is possible that the wax, which is considered to be high performance, has a higher safety risk.

1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンとは、一般的に固体の燃料と、液体あるいは気体の酸化剤を推進剤とするハイブリッドエンジンを用いた化学ロケットエンジンのことである。固体燃料として不活性な材質を採用できること、相が異なるため酸化剤と燃料に親和性がないことから、ハイブリッドロケットエンジンは、固体や液体ロケットエンジンに比べ、爆発の危険性が少なく、安全性の高いものとされている。しかし、燃料が何らかの衝撃で粉塵になってしまった場合には、粉塵が急速な燃焼を発生する可能性がある。既往研究でも、燃料の破砕状況がハイブリッドロケット推進剤による爆風の威力に影響を与えた可能性が示唆^[1]されている。従って固体燃料粉塵化がハイブリッドロケットエンジンの安全性を評価する上でのキー現象と言える。そのため、固体燃料の粉塵化を評価するための取り組みが始められている。これまでにポリプロピレン、アクリル樹脂といった材質について固体燃料破砕試験が実施され、固体燃料の靱性が低く、破砕エネルギーが高く、燃料体積が小さいほど粉塵が発生しやすい傾向が報告^[2-4]されている。しかしながら、固体燃料として広く採用されているワックスと末端水酸基ポリブタジエン（以降 HTPB）については未だ評価が十分に行われていない。そこで本研究では、破砕試験やふるい分析の実施によりマイクロクリスタリンワックス（以降 WAX）と HTPB の粒度分布を取得して上記の傾向に合致しているかを確認し、それぞれの粉塵の発生し易さを評価する。

2. 実験方法

今年度は HTPB の破砕試験と、HTPB および WAX

のふるい分析を実施した。WAX の破砕試験は昨年度実施^[5]された。

2. 1. 固体燃料破砕試験 (HTPB)

破砕試験の供試体は防衛大学校にて作製した。HTPB の諸元を Table 1 に示す。供試体端面中央に孔をあけ、雷管、あるいは雷管と P-4 爆薬を挿入できるようにした。

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 ³ (30 °C)

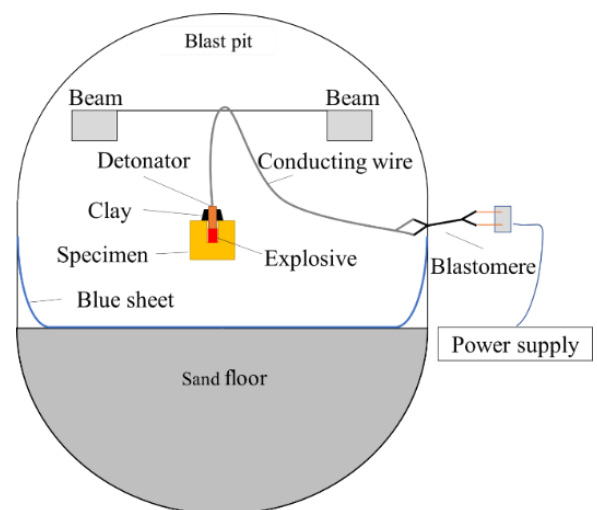


Figure 1. Schematic diagram of equipment for fuel fragmentation tests

Table 2. Experimental conditions

Size [mm]	Energy	Times
φ 30×30	Detonator only	3
φ 30×30	Detonator + P-4 2 g	3
φ 50×50	Detonator only	3
φ 50×50	Detonator + P-4 2 g	3

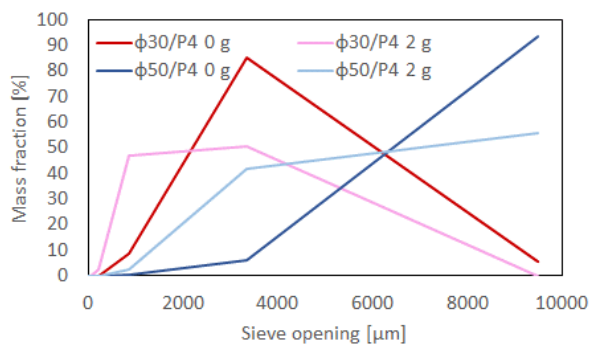
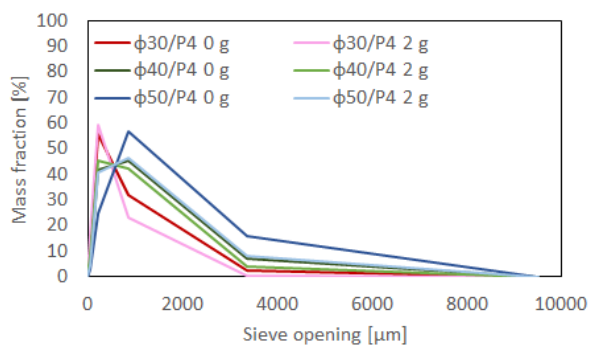
破砕試験は防衛大学校火薬類実験施設の爆発ピットにて計12回実施した。Figure 1に爆薬ピットでの破砕実験の概略を示す。Table 2に試験条件を示す。雷管、あるいは雷管と爆薬で供試体を破砕し、ピット内に落下した破片を回収した。

2. 2. ふるい分析

回収した破片はまず雷管の破片や油粘土、ごみ等を取り除いた。次に水平旋回篩（アズワン：SKH-01）にてふるいにかけて。ふるい目開きは9500, 3350, 850, 212, 53 μmである。目開きごとにふるい上の破片の質量を電子天秤で計測した。ふるい作業はJISZ8815:1994に基づき行われた。

3. 実験結果及び考察

HTPBの粒度分布をFigure 2に示す。WAXの粒度分布をFigure 3に示す。なお、グラフは各条件3回の平均値である。

**Figure 2.** Particle size distribution (HTPB)**Figure 3.** Particle size distribution (WAX)

これらのグラフを比較すると、HTPBの方がWAXより、数100 μmオーダの破片の質量分率が大幅に少ないことが確認できた。これは、WAXがより脆性的な材料であるのに対して、HTPBは、比較的高弾性を有した材料であるためと考えられる。

爆薬の有無と供試体のサイズについても粒度分布の傾向が確認された。爆薬の有無では有りの方が、サイズでは小さい方が、細かい破片の質量分率が高まった。この傾向は材質を問わず確認された。

以上の傾向は、既往研究^[2-4]の成果とも一致している。

4. 結論と今後の課題

供試体のサイズが小さく、破砕のためのエネルギー量が大きく、供試体の材質が脆いほど粉塵が発生し易いことが、WAXとHTPBについて確認された。WAXは燃料後退速度の点で一般にHTPBより優れるが、安全上はより高リスクとなることが分かった。

今後は供試体材料を用いて衝撃試験を実施し、材料の靱性を定量的に評価する予定である。

5. 参考文献

- [1] C. Wilton: "Investigation of The Explosive Potential of The Hybrid Propellant Combinations N₂O₄/PBAN and CTF/PBAN", Air Force Propulsion Laboratory, 1967.
- [2] 高橋晶世:「ハイブリッドロケット推進薬に係る保安距離の定量評価に関する研究」, 平成29年度東京大学博士論文, 2018.
- [3] 高橋晶世:「ハイブリッドロケット推進薬の安全性に係る燃料粉塵化の定量評価に関する研究」, 日本学術振興会, 19K15212, 2019-2021.
- [4] Kitagawa, K., Nakayama, Y., Matsuyama, T., Wakabayashi, K., Toda, R., Morita, T. and Shimada, T.: "Experimental Study of Fragmentation of Hybrid Rocket Fuel", Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.12, No. ists29, pp Pa_15-Pa_20, 2014.
- [5] 岡野初音, 伊藤将人:「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」, 令和2年度日本大学理工学部卒業論文, 2021.

謝辞

本研究の実施に当たっては、防衛大学校応用科学群応用化学科教授・甲賀誠先生に多大なご支援を賜りました。また当学科の大出拓海さん、小笠原大虎さん、坪倉慧昂さんには供試体作製と実験実施に協力していただきました。厚く御礼申し上げます。