

K-17

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じん化

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

○秋山莉久¹, 宮本龍之助¹, 高橋晶世²Riku Akiyama¹, Ryunosuke Miyamoto¹, Akiyo Takahashi²

For the purpose of safety evaluation of hybrid rocket propellant, specimen crushing tests were conducted and particle size distributions were obtained. The experimental results suggest that the higher the crushing energy and the smaller the fuel volume, the more likely it is to generate dust, which is consistent with the trend.

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。固体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。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り再着火も可能なことである。また、固体燃料が不活性であるため、製造から運用に至るまで安全で取り扱いが容易である^[1]。しかし我が国では、ハイブリッドロケット打ち上げの際に必要な安全評価基準が定まっていない。また、安全性が高いとされるが、事故発生時の衝撃等により、固体燃料が粉じん化する可能性がある。粉じんが発生すると、酸化剤と混合して急速な燃焼を引き起こす可能性がある。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じん化が大きく関わってくる。

これまでの先行研究により傾向として固体燃料にかかるエネルギーが高く、固体燃料の靱性が低く、固体燃料の体積が小さいほど粉じんは発生しやすい^[2]ことがわかっている。昨年度、当研究室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)に黒鉛を混和させたものを用いた。一般的に、HTPB をハイブリッドロケットエンジンの固体燃料とする際にはカーボンブラック(以降 CB)の粉末が混和される。固体燃料を黒色にすることで固体燃料内部での放射熱の吸収性を防止するためである^[3]。

そこで今年度は、アルミニウム(以降 AL)粉末・CB粉末をそれぞれ HTPB に混和させた供試体(以降 HTPB+AL, HTPB+CB)を作製し、破碎試験を実施する。その後、破片をふるいにかけて粒度分布を作製する。

また、HTPB+AL と HTPB+CB の衝撃試験を実施し、靱性の評価を行う。そして、破碎試験と衝撃試験の結果を用いて、各材質における粉じんの発生しやすさを可視化できる破碎モデルを作成する。

2. 実験方法

2. 1. 供試体試作

破碎試験で使用する供試体の組成を決定するために、日本大学生産工学部機械工学科にて HTPB+AL 及び HTPB+CB をそれぞれ 5 種類ずつ条件を変えて試作した。主成分である HTPB の諸元を下記の Table 1 に示す。HTPB にイソホロンジイソシアネート(以降 IPDI)(富士フィルム和光純薬株式会社, LOT:CAR2802)と AL 粉末 3 μm(株式会社高純度化学研究所, ALE11PB, LOT:5046432)や CB 粉末 80 nm(旭カーボン株式会社, アサヒサーマル)を混和し、60 °Cにて加熱して硬化させた。

Table 1. HTPB Specifications

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

供試体の定性的な硬軟から以下の組成に決定した。

Table 2. Results of trial production of specimen

粉末種類	HTPB 使用量 [g]	IPDI 使用量 [g]	粉末 使用量 [g]	[NCO]/[OH]
AL	25	2.81	20.45	1.25
CB	40	3.60	4.00	1.00

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

HTPBに対しIPDIは外割8%, AL粉末は内割45%, CB粉末は外割10%としている。

2. 2. 供試体作製

破砕試験で使用する供試体を防衛大学にて作製した。HTPB+AL及びHTPB+CBの供試体サイズを $\phi 30 \times 30$ (外径30mm, 全長30mm), $\phi 50 \times 50$ (外径50mm, 全長50mm) 各6個ずつ計24個作製した。



Figure 1. Specimen ($\phi 50 \times 50$), ($\phi 30 \times 30$)

2. 3. 破砕試験

破砕試験は防衛大学火薬類実験施設の爆発ピットにて計24回実施した。供試体の端面中央の孔に雷管のみ・雷管+P-4爆薬2gを挿入し、上から油粘土で固定した(参考Figure 2)。Figure 3に爆発ピットの概略図を示す。試験時の供試体の位置は、供試体底面が床から1mとなるように、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。瞬間電気雷管(北海道日油株式会社, HNM-JD-001)で供試体を破砕し、ピット内に落下した破片を回収した。このとき、破片の回収目標は破砕前の供試体質量の98%以上とした。

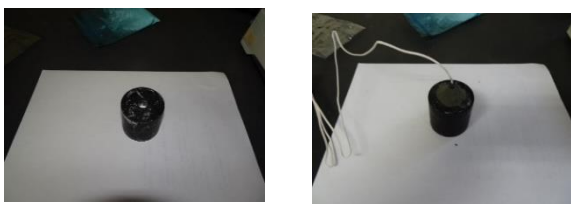


Figure 2. Specimen ($\phi 50 \times 50$)

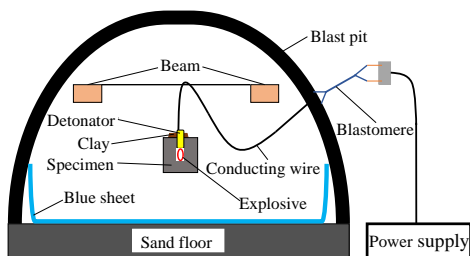


Figure 3. Schematic Diagram of Equipment for Fuel Fragmentation tests

3. 実験結果



Figure 4. Specimen crushing

Figure 4の上2つの画像は破砕前の供試体外形が $\phi 50 \times 50$, 下2つの画像は $\phi 30 \times 30$ のものである。また, Figure 4の左側2つ画像は雷管のみの破砕、右側2つの画像は雷管+P-4爆薬2gによる破砕である。4つを比較すると、右下の破砕前の供試体外径が $\phi 30 \times 30$ で、雷管+P-4爆薬2gによる破砕を行ったものが最も破片が小さくなった。このことから、破砕エネルギーが高く、固体燃料体積が小さいほど粉じんが発生しやすいという傾向に合致したと考えられる。

4. 今後の予定

- JIS Z 8815:1994に基づき、回収した破片をふるいにかけて、HTPB+AL及びHTPB+CBの粒度分布を作製する。
- シャルピー衝撃試験を行い、HTPB+AL及びHTPB+CBの靱性を測定する。
- 以上のデータをもとに、燃料粉じん化を評価する破砕モデルを作製する。

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.