

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関する研究 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 Fuels in the Atmosphere

○岡小夏¹, 高橋晶世²

*Konatsu Oka¹, Akiyo Takahashi²

To evaluate the safety of solid fuels in hybrid rocket engines, crushing tests and particle size distribution measurements were conducted. The tests revealed fragment size trends with specimen size and charge, and provided the particle size distribution of PP from crushed $\phi 50 \times 50$ mm specimens.

1. 研究背景と目的

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未整備である。ハイブリッドロケットエンジンは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し、酸化剤と混合して急激な燃焼を引き起こす可能性がある。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ため、これまでに固体燃料を爆薬で破碎し、破片の粒度分布を取得することで粉じん化を評価する取組が行われてきた^[1,2]。

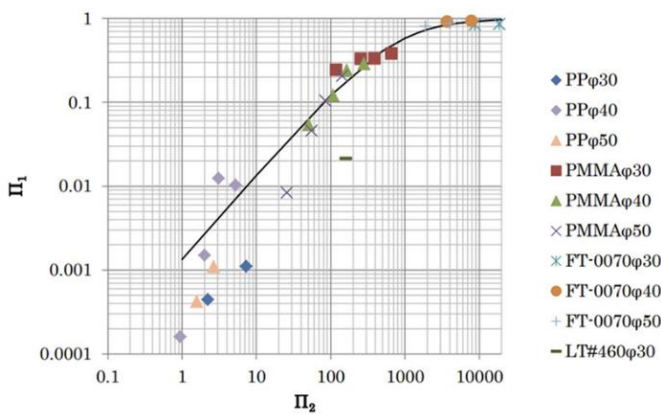


Figure 1. Fracture Models in Previous Studies^[1]

Figure 1 は先行研究^[1]で作成された、機体が事故等により衝撃を受けた際に、燃料から発生する 500 μm 以下の粉じん質量を推定可能な破碎モデルである。Pi₁は粉じん質量と燃料質量の比、Pi₂は印加エネルギーと吸収したエネルギーの比である。先行研究^[1]では 100 L の密閉型爆発容器を用いて破碎実験が行われており、傾向としては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ことが分かっている。しかし限られた空間（以下「環境体積」と呼ぶ）で実験が行われていたため飛散した破片や粉じんが容器壁に衝突して二次破

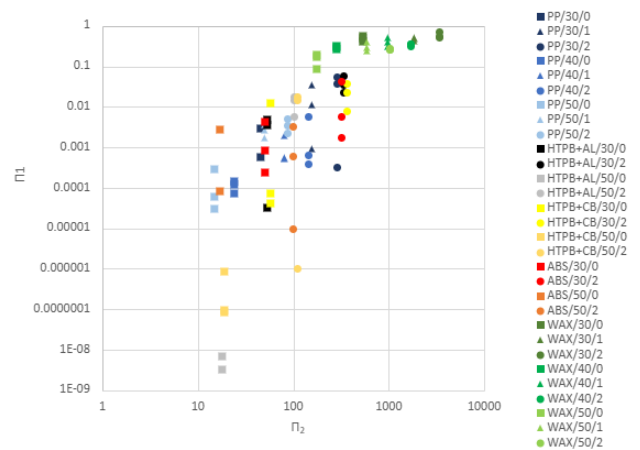


Figure 2 Fracture Models in Previous Studies^[2]

碎を生じた可能性があり、その有無は確認されていない。このような、環境体積の影響が不明確である点、また、再現性が十分に確認されていない点が技術的課題として残されている。

Figure 2は先行研究^[2]で作成された破碎モデルである。先行研究^[2]では、試験場を防衛大学校爆発ピットに移すことで、二次破壊を抑制した。また、試験回数を増やして再現性が確保された。しかし、環境体積の影響の定量的な評価には至っていない。そこで本研究では、先行研究^[1]と同じポリプロピレン（以下 PP）を用いて、密閉型爆発容器での結果と比較し、環境体積の影響を明確化する。

2. 破碎試験

2. 1. 試験方法

PP を供試体として、大きさ 2 種類 ($\phi 50 \times 50$ mm 及び $\phi 30 \times 30$ mm)、印加エネルギー 2 種類（雷管のみ・雷管+P-4 爆薬 2 g）、計 4 条件を各 3 回ずつ、計 13 回（内再実験 1 回含む）実施した。供試体の端面中央の孔に雷管のみ、あるいは雷管+P-4 爆薬 2 g を挿入し、上から油粘土で固定した。発破時の供試体底面が床から 1

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

m になるように、ピット内にひもと雷管のコードで供試体を吊り下げた。

瞬間電気雷管（北海道日油株式会社，HNM-JD-001）および P-4 爆薬 2 g（日本工機株式会社製）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、破片の回収質量目標は破砕前の供試体質量の 98% 以上とした。

2. 2. 結果と考察

すべての実験において、破砕後の試験片を、破砕前の質量の 98% を上回るように回収することができた。



Figure 3. Specimen After Test

Figure 3 において上 2 つの画像は、 $\phi 50 \times 50$ mm の破砕後の試験片、 $\phi 30 \times 30$ mm の破砕後の試験片であり、左側 2 つの画像は雷管のみで破砕した試験片、右側 2 つは雷管+P-4 爆薬 2 g で破砕した試験片である。

$\phi 50 \times 50$ mm より、 $\phi 30 \times 30$ mm の試験片のほうがどちらの条件でも破片が小さくなった。また、雷管のみと雷管+P-4 爆薬 2 g の条件で比較すると、雷管+P-4 爆薬 2 g で破砕した試験片のほうが破片が小さくなった。最も破片が細くなったのは $\phi 30 \times 30$ mm の供試体を雷管+P-4 爆薬 2 g の条件で破砕したものであった。このことから、本試験の結果は、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先行研究^[1,2]の傾向に合致したと考えられる。

3. 粒度分布測定実験

3. 1. 試験方法

破砕試験で得た供試体破片を秤量したのち、水平旋回篩（アズワン株式会社，SKH-01）にふるいを設置し、供試体破片を投入する。ふるい（JIS Z 8815:1994）の使用目開きは 9500, 3350, 850, 500, 212, 53 μ m である。水平旋回篩の回転数を 210 rpm に設定し、10 分間作動

させる。粒径ごとに供試体破片を収集し秤量する。この秤量の結果をもとに粒度分布を作成する。

3. 2. 結果と考察

今回は $\phi 50 \times 50$ mm の条件で粒度分布測定実験を行った。Figure 4 は $\phi 50 \times 50$ mm の供試体破片の粒度分布である。

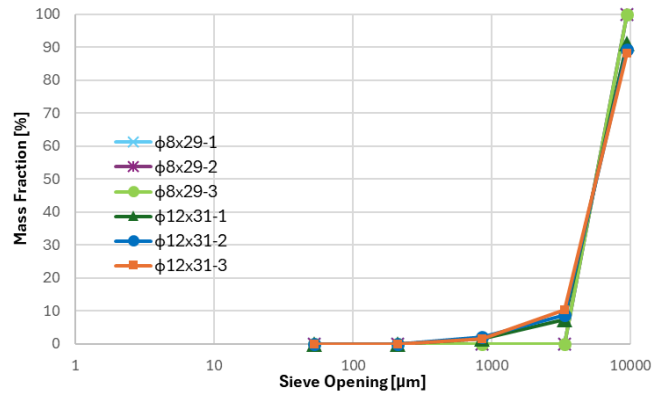


Figure 4 $\phi 50 \times 50$ mm Particle Size Distribution

Figure 4 から雷管のみでは 99% 以上、雷管+P-4 爆薬 2 g では、88% 以上が 9.5 mm 以上の大きさの破片で構成されていることが読み取れる。いずれの条件においても粉じんとみなせる 500 μ m 以下の破片は確認できなかった。先行研究^[1]の計算では、 $\phi 50 \times 50$ の雷管+P-4 爆薬 2 g の条件で 0.11 g の粉じんが発生すると推定され、少なくとも 0.04 g の粉じんが回収された^[1]。従って、密閉容器の実験では二次破壊が発生していた可能性がある。

4. 結論

破砕試験により、供試体の大きさと爆薬量による破片の大きさの傾向を確認できた。今後、 $\phi 30 \times 30$ mm の条件でも粒度分布測定実験を行い、各試験条件において粒度分布を得る。また、破砕試験と同様の PP で衝撃試験を行い、靱性値を得る。それらのデータを先行研究^[1]と比較し、環境体積の影響および破砕モデルの変化を明らかにする。

5. 参考文献

- [1] Takahashi, A., Kitagawa, K., and Shimada, T.: "Evaluation of Safety Distance for Blast of Hybrid Rocket Propellants", AIAA 2019-3197, 2019
- [2] 品田千羽: 「ハイブリッドロケット固体燃料の安全評価の安全評価のための破砕モデル作成」, 日本大学理工学部卒業論文, 2025