

K-40

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 atmospheric atmosphere

○品田千羽¹, 高橋晶世²Kazuha Shinada¹, Akiyo Takahashi²

Impact and crushing experiments were conducted to evaluate the safety of materials used for solid fuel in hybrid rocket engines. As a result, the toughness of the material used for the solid fuel was confirmed by the impact test, and the particle size distribution of ABS resin particles was obtained by using ABS resin selected from the impact test data for the crushing experiment.

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明確に定まっていない。また、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激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^[1]から、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。

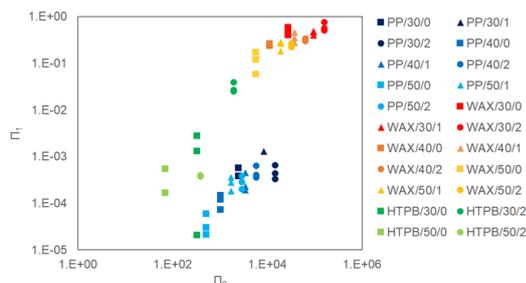


Figure 1. Fracture models in previous studies^[2]

Figure 1 は先行研究^[2]で作成された破砕モデルである。横軸は破砕の際に供試体へ印加されるエネルギーと供試体が吸収するエネルギーの比を示しており、縦軸は、粉じん質量と破砕前の供試体の質量との比を示している。グラフの右上ほど粉じんが発生しやすい条件であることが読み取れる。しかしながら、本来グラフが1系統になるべきところ、2系統出来ている。このようになった原因として、衝撃試験における供試体の固定方法が統一されていなかったために供試体の物性(靱性)評価が不適切になっていたと考えられる。

そこで今年度は、破砕モデルを修正することを目的として、供試体の固定方法を統一した形で衝撃試験を改めて実施する。さらに、衝撃試験の結果次第では、これまでと異なる靱性を有し、かつハイブリッドロケットエンジンの固体燃料として使用される新たな材質を供試体として、破砕モデルにデータを追加する。

2. 衝撃試験

2. 1. 試験方法

固体燃料の靱性は、シャルピー衝撃試験機(安田精機, No.258)を用いて取得する。衝撃試験の供試体は高さ4 mm, 幅10 mm, 長さ80 mmの大きさで、各供試体の中央には0 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mmの切れ込みを入れて、各6回ずつ衝撃試験を行った。切れ込みを入れたのは、供試体の中心から破断することとフラットに破断することを促すためである。シャルピー衝撃試験機に供試体を設置して固定後、ハンマーを振り下ろし、供試体に衝突後のハンマーの振れ上がりの角度から供試体の吸収エネルギーを求める。

供試体に用いた材質は、先行研究において使用された末端水酸化ポリブタジエン(HTPB)にカーボンブラック粉末及びアルミニウム粉末を混和させた供試体^[2]とポリプロピレン(PP)^[3]である。供試体の両端を固定する方法を固定する方法は所定の大きさの粘着テープによる保持で統一した。

また、試験の結果HTPBとPPの靱性に差があまりないことがわかったため(後述)、これらの材質よりも低靱性の材質を選定することとし、追加でABS樹脂、ポリエチレン(PE)、アクリル樹脂の評価を実施した。

2. 2. 結果と考察

試験結果より、靱性を確認したところ、PE>PP及びHTPB>ABS樹脂およびアクリル樹脂の順に高いこと

が確認できた。HTPB と PP, ABS 樹脂とアクリル樹脂はそれぞれ同等の値を示した。プラスチック材料でも延性材料としての破壊挙動を示す PP や PE^[4]は靱性が高く、脆性材料に近いアクリル樹脂^[4]は靱性が低いことが確認された。また、熱硬化樹脂である HTPB はゴム製の材質であるため、ハンマー衝突時に弾性変形によりエネルギーを吸収した結果、靱性が高く評価されたものだと考えられる。

この結果を受けて、ABS 樹脂を供試体として破砕試験を実施することとした。

3. 破砕試験

3. 1. 試験方法

ABS 樹脂を供試体として、粒度分布を得ることを目的に破砕試験を実施した。防衛大学校火薬類実験施設の爆発ピットにて、供試体の大きさ 2 種類 (φ50×50 mm 及び φ30×30 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 12 回実施した。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。

Figure 2 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 1 m になるように、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をの 98 %以上とした。

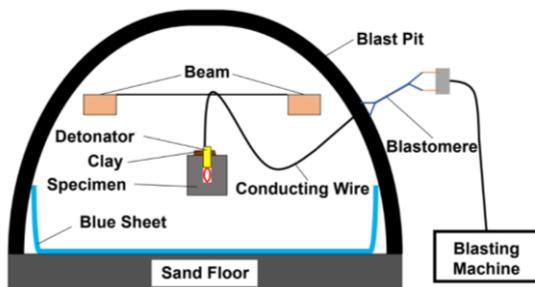


Figure 2. Schematic Diagram of Equipment for Fuel Fragmentation tests

3. 2. 結果と考察

全ての条件において、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出来た。Figure 3 の上 2 つの画像は破砕目の供試体外形が φ50×50、下 2 つの画像は φ30×30 のものである。



Figure 3. Specimen after test

また、左 2 つの画像は雷管のみの破砕、右側 2 つの画像は雷管+P-4 爆薬 2 g 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形が φ30×30 で雷管 P-4 爆薬 2 g による破砕を行ったものが最も破片が細かくなった。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傾向に合致したと考えられる。

4. 結論

衝撃試験により各材質の靱性を確認することが出来た。また、破砕実験によって供試体の大きさと爆薬の量による破片の大きさの傾向も確認できた。今後、破片をふるいにかけ、各試験条件の粒度分布を得る。そのデータと衝撃試験の値を用いて、破砕モデルをアップデートする。

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] 秋山莉久, 宮本龍之介: 「ハイブリッドロケットエンジンの固体燃料の安全評価の研究 大気雰囲気下における固体燃料の粉じん化」, 日本大学理工学部卒業論文, 2024
- [3] 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」, 日本大学理工学部卒業論文, 2021
- [4] 田口技術士事務所: 「プラスチック製品の強度設計基礎講座 第 3 回 強度設計に必要なプラスチックの基本特性」, 2024/10/2 閲覧。