

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15212

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Research on the quantitative evaluation of fuel fragmentation for safety of hybrid rocket propellants

研究代表者

高橋 晶世（TAKAHASHI, Akiyo）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：70821792

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ハイブリッドロケット燃料の粉塵化を評価するための破砕試験では、供試体の材質（靱性）・サイズ、爆薬質量をパラメータとして試験条件を設定した。供試体材質をポリプロピレン、マイクロクリスタリンワックス、末端水酸基ポリブタジエンとし、サイズ・爆薬質量条件も3条件とした。また供試体材質の靱性を評価するための衝撃試験を各材質につき実施した。靱性が低く供試体サイズが小さく爆薬質量が大きいほど小さな破片の比率が増すことが確認された。一方以上のデータをまとめて粉塵質量を評価するための破砕モデルを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くのハイブリッドロケットの研究において、ハイブリッドの安全性は研究の前提であり、ハイブリッドを採用することが宇宙輸送システムの安全化に直結するといった論旨が示されている。しかし、燃料が粉塵となれば爆発的な燃焼を発生する可能性はある。そこで本研究は燃料粉塵化に着目し、燃料破砕データの充実と燃料破砕モデルの構築を行った。これはハイブリッドロケット推進の安全の定量評価を実現する重要な一歩となるものである。それと同時に、ハイブリッドにとっての安全な燃料の条件を示し、ハイブリッド推進の安全性を促進することにも繋がるものである。

研究成果の概要（英文）：In the crushing test to evaluate the dusting of hybrid rocket fuel, the test conditions were set as parameters of specimen material (toughness), size, and explosive mass. The specimen materials were polypropylene, microcrystalline wax, and terminal hydroxyl group polybutadiene, and the size and explosive mass conditions were also set to three conditions. Impact tests were conducted on each material to evaluate the toughness of the specimens. It was confirmed that the proportion of small fragments increased with decreasing toughness, decreasing specimen size, and increasing explosive mass. The above data were combined to create a crushing model to evaluate the dust mass.

研究分野：ロケット推進

キーワード：破砕試験 衝撃試験 靱性 粒度分布

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) ハイブリッドロケットの安全性評価

非爆発性の推進系とは自発的に可燃性混合気やガス爆発を発生する可能性のない推進系のこと、一部のハイブリッドロケット (LO<sub>2</sub>/HTPB 等) が該当する。多くの研究者が固体・液体推進薬に対するハイブリッドの安全面の優位性を主張している (Chiaverini and Kuo, 2007)。一方ハイブリッドの安全を評価するための既存の基準としては US Air Force が発行するマニュアル AFMAN91-201 火薬類安全標準 (US Air Force, 2011) がある。これにハイブリッドロケット推進薬の TNT 換算率が挙げられており、15%、5%、<0.01%と想定する状況によって異なる。例えば 15%という値を我が国の基準 (宇宙開発利用部会、2016) に掲載されている固体推進薬の値 5%と単純比較してみると、ハイブリッドは固体以上の爆発被害を発生しうることになる。従ってハイブリッドロケットの安全性について既往研究の主張と既存評価基準の主張には差があるが、この差が生じる原因の究明を目的とした研究は少ない。AFMAN の数値の元となった研究 (Wilton, 1967①) があるが、供試体の種類や試験条件は限定的であり、また試験結果の説明に課題が残っている。そこで筆者は、博士研究 (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、H29年度、東京大学) で、ハイブリッドロケットの事故が発生した際に生じる爆風の威力を評価できるような数理モデルを構築した。この数理モデルは Wilton の試験結果と矛盾しない値を出力できる。この博士研究により爆風の威力には燃料の粉塵質量が大きく影響する可能性のあることがわかった。非爆発性ハイブリッド推進薬においては燃料成分と酸化剤成分に親和性がないため、燃料が粉塵とならない限り爆発的な燃焼を発生することは考えにくい。従ってハイブリッド推進薬の安全性においては燃料粉塵化がキー現象であると推定されるので、燃料粉塵化を精度よく評価することが重要である。

#### (2) 燃料破砕モデル

博士研究で作成した破砕モデルは既往研究で実施された破砕試験の成果を利用した (Kitagawa et al., 2014②)。この破砕モデルは、破砕試験を実施した環境体積の影響が不明、再現性が不明、モデルに用いる靱性値の精度が低いといった課題を残していた。そこで筆者は、これらの課題を解決する形で燃料破砕試験を実施して粒度分布のデータベースを構築し、衝撃試験を実施して靱性値を取得し、これらのデータに基づいてモデルを改めて作成することで燃料破砕モデルの向上を図ることとした。

### 2. 研究の目的

燃料粉塵化の定量的な評価法を構築する。定量的な評価法とは具体的には、ある条件のインプットにより粉塵質量を算出可能な数理モデル (燃料破砕モデル) であり、既往のモデルを見直して精度向上を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 燃料破砕試験

神奈川県横須賀市にある防衛大学校の爆発ピットで破砕試験を行う。ピットの体積は既往研究の試験チャンバの約 500 倍である。ピットでの試験結果を Kitagawa らの試験結果と比較することによって、体積の影響が明らかになり、かつ、二次破壊の発生を抑制することが可能となる。また既往研究では、全 42 条件が各 1 回実施された。従って試験結果の再現性、ばらつきといった統計的な評価は困難である。そこで新たな試験では、まず各条件 3 回を目途に試験を実施し、試験結果のばらつきを評価した上で改めて追加試験有無を検討する。なお、供試体となる燃料の材質を選定するにあたっては、まず、それが広く用いられているハイブリッドロケット燃料であることを考慮する。次に、燃料の靱性が粉塵質量に影響することがわかっているため、靱性値が試験パラメータとなるように、靱性値が明確に異なる材質を複数採用する。

#### (2) 衝撃試験

筆者の博士研究で作成された破砕モデルでは、靱性として各材料の引張強度と破断歪から求めた推定値を用いた。この推定値で燃料の吸収エネルギーを評価したが、推定値の算出に用いた物性値は試験結果としての値ではなく各材質の一般的な代表値であり、定量的な評価を行うには精度が不足していた。そこで新しい試験では、再現性が高いとされているシャルピー衝撃試験を採用して試験片の吸収エネルギーを直接求めることで燃料の吸収エネルギーに関するデータの精度向上を図る。当研究室所有のシャルピー衝撃試験機 ((株)安田精機製作所、No. 258) は JISB7739:2011 に準拠している。ハンマを振り下ろして供試体 (80 × 10 × 4 mm 板ノッチ有、JISK7111-1:2012) を破壊し、ハンマと同時に回転した針の振上がり角度を読み取る。その角度と使用したハンマの種類から、試験機メーカー支給の換算表により、供試体の破壊に要したエネルギーを定めることができる。そのエネルギーを各供試体の破断面積で除して衝撃値を得る。この衝撃値により、靱性を評価することができる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 燃料破砕試験

ポリプロピレンおよびマイクロクリスタリンワックスについては、各サイズ・爆薬質量 9 条件 27 回をそれぞれ終了し、ふるい分析による粒度分布取得も終了した。末端水酸基ポリブタジエンについては、新型感染症禍で作業人員・日数が制限されたため、破砕試験条件を絞り込み、4 条件 (φ 30x30mm、φ 50x50mm、P4 爆薬が 0g、2g) 12 回を実施し、ふるい分析による粒度分布取得も終了した。ポリプロピレンではこれまでの予測通り、粉塵とされる 500 μm 以下の破片はほぼ発生しないことが再現性をもって確認された (図 1)。一方マイクロクリスタリンワックスでは小さい破片の比率が高く (図 2)、末端水酸基ポリブタジエンでは他 2 種の間 (図 3) であった。また破砕試験を行う環境の体積の影響について既往研究の結果と比較したところポリプロピレンでは明確な違いはなかったが、ワックスでは既往研究にてチャンバ壁による二次破壊が発生していた可能性がある。今後さらに検証を行う。

##### (2) 衝撃試験

ポリプロピレン、マイクロクリスタリンワックスおよび末端水酸基ポリブタジエンの靱性値を評価した。ただし、WAX はエネルギー吸収が小さく、当研究室所有の最小エネルギー用ハンマでも振上がり角度が規定の評価範囲内を外れたため参考値、末端水酸基ポリブタジエンはハンマ衝突時の弾性変形が大きく、試験を行うために規定の手順にない供試体の固定を実施したため、参考値となったが、マイクロクリスタリンワックスの靱性が最も低いことが確認された。以上のデータを用いて燃料破砕モデルを作成した (図 4)。粉塵発生に対する靱性・爆薬質量・供試体サイズの影響の傾向が再現できた。マイクロクリスタリンワックスおよび末端水酸基ポリブタジエンについて、靱性の再評価により  $\Pi_2$  の値が右に移動する見込みである。既往モデルからの変化について、靱性の評価方法を改善した影響が大きかった。継続して靱性評価の取り組みが必要であるものの、破砕モデルの精度向上が達成できたといえる。

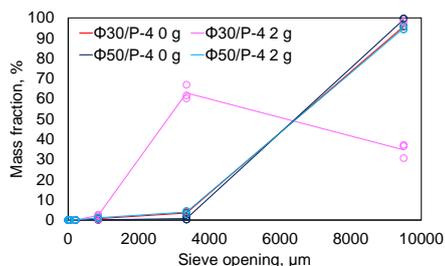


図 1 ポリプロピレン粒度分布

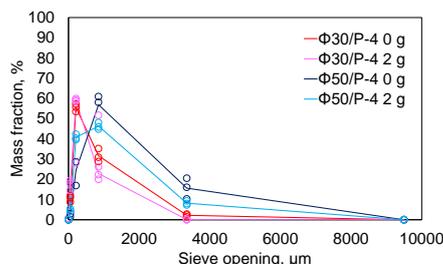


図 2 マイクロクリスタリンワックス粒度分布

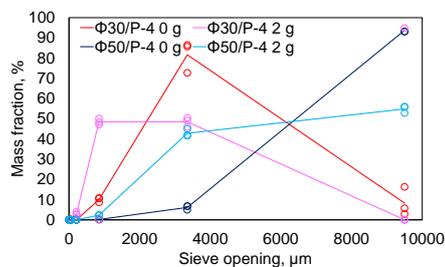


図 3 末端水酸基ポリブタジエン粒度分布

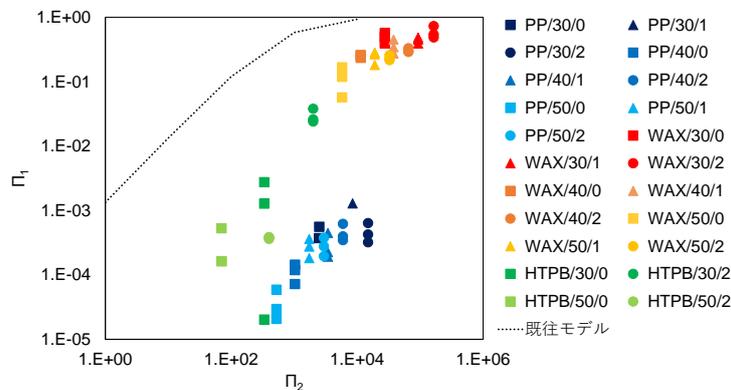


図 4 燃料破砕モデル

##### <引用文献>

- ①Wilton, C., Air Force Rocket Propulsion Laboratory, AD/ A 003 595, 1967
- ②Kitagawa et al., Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 12(ists29), Pa\_15-Pa\_20, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akiyo Takahashi
2. 発表標題 The Fragmentation Test Results for Hybrid Rocket Fuels (Polypropylene)
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋晶世
2. 発表標題 ハイブリッドロケット燃料の破砕試験計画
3. 学会等名 第二回ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋晶世
2. 発表標題 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に関する研究 実験速報 (1)
3. 学会等名 火薬学会2020年度春季研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------