

ハイブリッドロケット燃料の破砕試験計画

高橋晶世^{*1}

*1 日本大学理工学部

The fragmentation test plan for hybrid rocket fuels

Akiyo TAKAHASHI^{*1}

*1 College of Science and Technology, Nihon University

ABSTRACT

The author plans to conduct fuel fragmentation tests to construct a database for modeling of fuel fragmentation of hybrid rocket propellants and has developed the test plan. The test conditions were set in such a way as to be able to solve the problems in the fuel fragmentation tests in the previous research. In particular, this time the ability to perform the tests in the explosion pit makes it possible to clarify the influence of the volume of the fragmentation test environment, which was one of the problems, on the particle size distribution of fragments. Also, a fuel fragmentation test demonstration was conducted and the particle size distribution compared with a previous test.

Keywords: Fuel dust, Dust explosion, Hybrid rocket propellants, Safety, TNT equivalents

概要

著者はハイブリッドロケット燃料の破砕モデルを作成するためのデータベースとする目的で燃料破砕試験を実施する予定であるが、その試験計画を立案した。既往研究での破砕試験における課題を解決できるような形で試験条件を設定した。特に今回、爆発ピットでの試験が可能になったことにより、課題の一つであった破砕試験実施環境の体積が破砕片の粒度分布に与える影響を明らかにすることが可能となった。また破砕試験デモを実施し既往試験と粒度分布を比較した。

1. はじめに

ハイブリッドロケットの安全性を評価する基準には米国空軍のマニュアルであるAFMANの基準¹⁾がある。当該の基準値を表1に示す。値が三つあるのは、ロケットが曝される状況を三つ（爆薬事故、衝突、落下）想定しているためである。しかしながら、その内容は限定的であり改善や補足の余地がある。例えばハイブリッドロケット推進薬の組合せが1種類に限定されている。また想定される状況によりTNT換算率の値が異なることを示しているものの、爆薬質量等、他にもTNT換算率に影響を与え得る因子は存在する。

そこで著者は、TNT換算率にこだわらず、ハイブリッドロケット推進薬の材質や事故状況が変化しても保安距離を評価できる方法の提案を目的として、燃料粉塵化に着目して研究²⁾を行ってきた。図1はハイブリッドロケット推進薬による爆風に対する保安距離を評価するためのモデルの全体図である。図中の記号など、詳細は上記の研究²⁾を参照のこと。この中のFuel Fragmentationで燃料の粉塵質量を評価する。そのための破砕モデルを、上記の研究²⁾において図2・式1のように作成した。図2中の細線が式1となっている。この破砕モデルは、樹脂材料の物性とサイズが決まれば、材料への付与エネルギーと粉塵の量の関係が推測可能である。ただし Π_1 は粉塵質量 m_{dust} と燃料質量 M の比、 Π_2 は燃料に与えられたエネルギー W と燃料が吸収するエネルギーの比である。 K_c' は燃料の靱性、 V_f は燃料の体積である。

$$\Pi_1 \left(1 + \frac{743.829}{\Pi_2^{1.00418}} \right) = 1 \quad (1)$$

ただし

$$\Pi_1 = \frac{m_{dust}}{\frac{M}{W}}$$

$$\Pi_2 = \frac{M}{K'_c V_f}$$

$$\Pi_2 \rightarrow 0 \text{ のとき } \Pi_1 \rightarrow 0$$

$$\Pi_2 \rightarrow \infty \text{ のとき } \Pi_1 \rightarrow 1$$

この破砕モデルの元となった既往研究はKitagawaらによるもの³⁾である。Kitagawaらは供試体として5種類のハイブリッドロケット燃料を用いて破砕試験を行った。また供試体のサイズと破砕に用いる爆薬を試験パラメータとした。Kitagawaらは破砕後の供試体を回収してふるい分析を実施し、試験毎に粒度分布を得た。このKitagawaらの粒度分布から、粉塵質量を推定して得た値が図2のマーカである。なお、粉塵サイズは500 μm以下としている。このKitagawaらによる既往研究に基づいた破砕モデルは、下記の課題を残していた。

- 破砕試験を実施したチャンバ体積の影響が不明
- 破砕エネルギーの分配が不明
- 破砕試験の再現性が不明
- モデルに用いる靱性値の精度が低い（物性からの推定）

そこで著者は、上記の課題を解決する形で試験を実施してデータベースを構築し、そのデータベース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を目的として各種試験を実施することとした。本稿では、その課題解決に関する検討と、検討結果に基づく試験計画について報告する。

表1 エネルギー流体のTNT換算率 (AFMAN¹⁾より抜粋)

| Energetic fluids | TNT equivalents, % | |
|--|--------------------|-------------------|
| | Static test stand | Range launch |
| LO ₂ /RP-1 | 10 | 20, up to 227 ton |
| N ₂ O ₄ /PBAN (Hybrid propellant) | 15 | 15 |
| | 5 | 5 |
| | <0.01 | <0.01 |

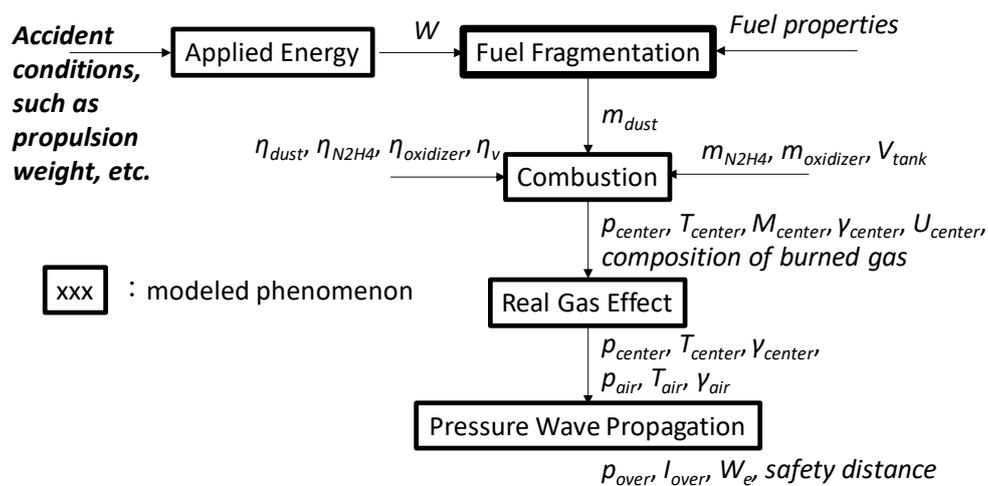


図1 ハイブリッドロケット推進薬の爆風評価モデル²⁾

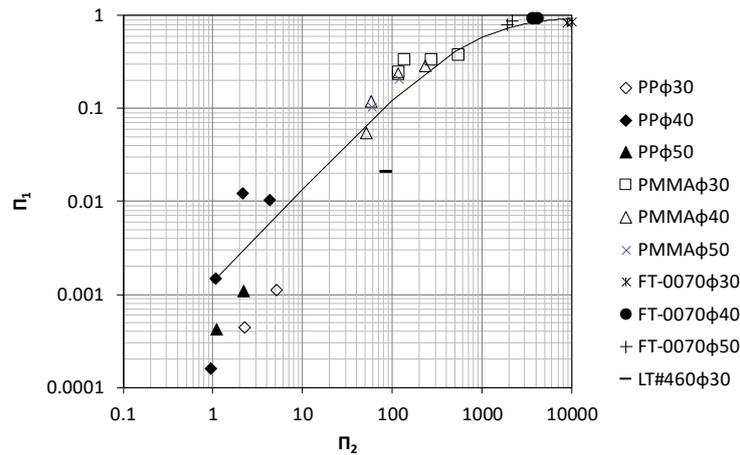


図2 燃料破砕モデル²⁾

2. 課題解決に関する検討とその他の試験条件

2.1. 課題解決検討

2.1.1. 試験環境

前項で示した課題の解決方法について、ここから述べていく。まずは体積の影響である。Kitagawaらの既往研究³⁾では、破砕は6号雷管およびP-4爆薬によって為されることが意図されていた。ただ、破砕の原因には爆薬のみならず、チャンバ壁への破片の衝突も考えられる（二次破壊）。粉塵の成因が不明なままでは、適切な破砕モデルの構築は困難である。しかしながら、既往研究にて試験が行われたチャンバはパラメータとなっておらず、全試験を通じてφ480 x L655 mmのチャンバが使用された。従ってチャンバ体積の大小が粉塵質量の増減に与える影響が不明となっている。

そこで新たな試験では、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。ピットはφ4600 mの半球ドーム形であり、下半球は砂で埋められている。ピットの形状を図3に示す。ピットの体積はKitagawaらのチャンバの約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、二次破壊の発生自体を抑制することが可能となる。

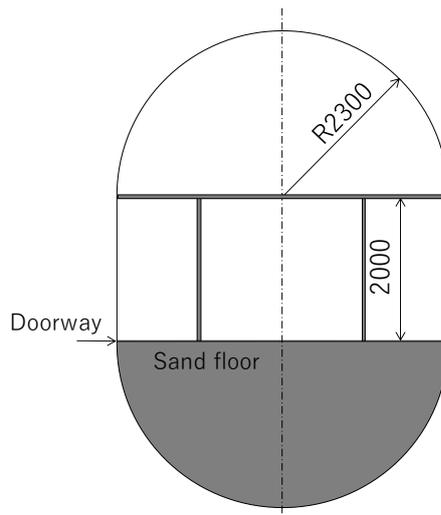


図3 防衛大学校爆発ピット形状

2.1.2. エネルギー分配

次に破砕エネルギーの分配について説明する。雷管や爆薬によるエネルギーは、燃料の破砕のみ

ならず破片の運動にも消費される。エネルギーの分配を見積もるには、破片の運動を観察しなければならないが、既往研究³⁾では実施されなかった。本来は破砕に消費されたエネルギーが破砕モデルに用いられるべきであるが、このエネルギー分配が困難であったために、燃料への印加エネルギーが用いられた。

そこで新たな試験では、ハイスピードカメラにて破砕試験の様子を観察する。現在のところ、ACS-1（株式会社ナックイメージテクノロジー、10万fps / 1280 x 288 pixel）およびNOVA S12（株式会社フオトロン、最高100万fps）を使用見込みである。

2.1.3. 再現性

次に試験結果の再現性について説明する。既往研究³⁾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。

2.1.4. 靱性

次に燃料の靱性（吸収エネルギー K'_c/V_f ）について説明する。著者の既往研究²⁾で作成された破砕モデル式1では、靱性 K'_c 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（JIS K-7110、-7111に基づく）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。現在のところ衝撃試験機は株式会社安田精機製作所No.258-Dを使用予定である。

2.2. その他の試験条件

2.2.1. 供試体（燃料）材質

供試体となる燃料の材質を選定する基準は、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である。次に、著者の既往研究²⁾から、燃料の靱性が粉塵質量に影響することがわかっている。そこで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べきである。表2に候補となる材質と各靱性値（引張強度と破断歪による推定値）を示す。さらに、Kitagawaらの既往研究³⁾と比較のため、少なくとも1種類はKitagawaらと同じ材質を用いるべきである。

表2 燃料材質の靱性比較

| Materials | Tensile strength x Breaking strain, MPa | Comments |
|----------------------|---|--|
| Paraffin wax | 1.5e-2 | FT-0070, Nippon Seiro Co.,Ltd. |
| Polyethylene | 17 | |
| HTPB + Al | 16 | From author's research ²⁾ |
| Polypropylene | 59 | |
| HTPB | 16 | |
| PMMA | 1.0 | |
| Microcrystalline wax | > Paraffin wax | By personal communication with Nippon Seiro Co.,Ltd. |

以上のことから、新しい試験では、ポリプロピレン、HTPB+Al（45%混）、マイクロクリスタリンワックスを採用する。これらは靱性推定値の高低が明確に分かれているためパラメータとして優れ、かつハイブリッドロケット燃料として用いられている。また特にHTPB+Alは、のちに燃料破砕モデルが保安距離評価モデルに組み込まれることを考慮し、保安距離評価モデルのフィッティング対象となる実験で用いられた材質であるPBAN+Alに近いということで選定された。

2.2.2. 供試体サイズと付与エネルギー

基本的にKitagawaらの既往研究³⁾を踏襲する。サイズはφ30 x L30 mm、φ40 x L40 mm、φ50 x L50 mmである。爆薬は6号雷管とP-4爆薬（0、1、2 g）で、いずれも日本工機株式会社製を使用予定で

ある。

3. 破砕試験デモ

3.1. 概要

爆薬量の過不足や破片回収可否を確認するために、防衛大学校爆発ピットにて破砕試験デモを行った。実施日は2019年6月21日で、2回試験を行った。供試体はポリプロピレンのφ30 x L30 mmで、1回は6号電気雷管のみ、もう1回は6号電気雷管およびTNT爆薬1.53 g（日本工機株式会社製の防衛大学校の在庫を利用。供試体の爆薬挿入孔に充填可能な質量）で実施した。

3.2. 試験実施状況と結果

TNT爆薬はP-4爆薬と比較して若干低い、ほぼ同じ発熱量⁴⁾である。従って設定した爆薬量の過不足を推測するのに問題ないと考えた。

試験の実施は以下の手順によった。

- 1) 気圧・気温・湿度等を測定し記録する
- 2) ピット床にシートを敷く
- 3) 試験条件に合わせて爆薬を秤量する
- 4) 試験条件に合わせて供試体の孔に雷管、あるいは雷管および爆薬を装填する
- 5) 供試体をひも、テープ類を用いてピット空中に保持する
- 6) 6号雷管を結線する
- 7) 6号雷管を起爆する
- 8) 供試体破砕後の試験片を回収する

回収した試験片はJAXAにおいてふるい作業、秤量を行う。回収に用いる袋は秤量しておく。

2回の試験の実施で、いずれも燃料の破砕と破片の回収が可能であることを確認した。ただし破片の回収率が元の供試体質量と比較して88.9%と、Kitagawaらの98.4%に比べ低い数字であった。回収した破片の粒度分布から粉塵質量を求めるので、破片の回収率を向上させるべきである。雷管のみの試験結果を、同条件のKitagawaらの結果と比較した図を図4に示す。これによれば、今回の試験結果はKitagawaらの粒度分布とほぼ一致した。従ってKitagawaらの試験において、チャンバ壁での二次破壊が発生していない可能性が示唆された。

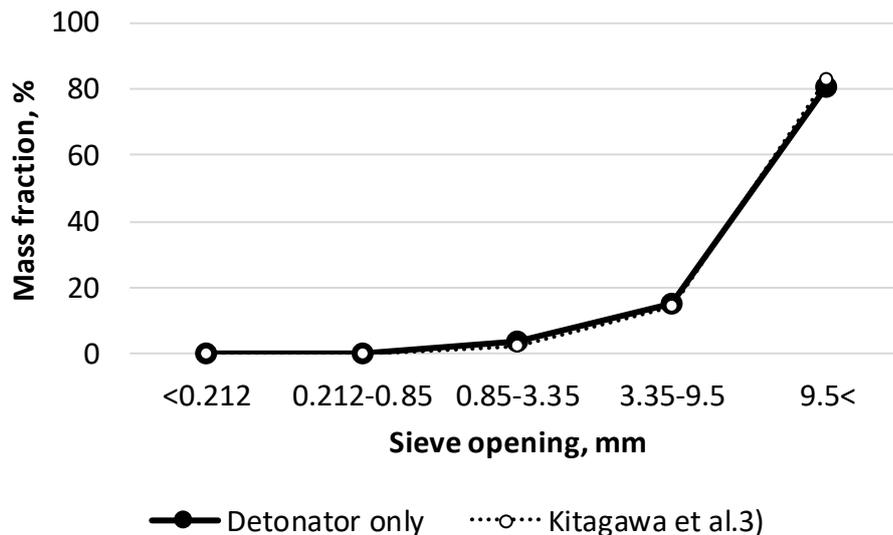


図4 粒度分布比較

4. まとめ

これまでの破砕試験や破砕モデルに残された課題を解決できるような形で破砕試験および衝撃試験を実施する。破砕試験は供試体材質3種類・供試体サイズ3種類・付与エネルギー3種類を各3回で

計81回の実施をベースとし、必要に応じて追加する。供試体の材質を試験片として衝撃試験を実施し、靱性に関するデータを取得する。

謝辞

実験に協力いただいている防衛大学校教授甲賀誠先生、同学修士一年富樫亮斗さん、千葉工業大学准教授和田豊先生、日本大学四年青木香奈実さん、ご討論いただいている宇宙航空研究開発機構教授嶋田徹先生、同助教北川幸樹先生、日本大学准教授高橋賢一先生に感謝する。また本研究は科研費・若手研究No. 19K15212の助成を受けている。

参考文献

- 1) US Air Force, “Explosives Safety Standards AFMAN91-201,” Air Force Manual [online manual], URL: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_se/publication/afman91-201/afman91-201.pdf [retrieved 18 November 2018].
- 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年度博士論文 (東京大学) .
- 3) Kitagawa, K., Nakayama, Y., Matsumura, 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, 2014, pp. Pa_15–Pa_20. doi: 10.2322/tastj.12.Pa_15
- 4) 株式会社グリーン・パイロラント, “化学物質の爆発安全情報データベース”, <http://explosion-safety.jp/DFact/MATERIAL/standardization.html> [retrieved 27 August 2019].