

ハイブリッドロケットエンジン用推進薬の安全評価についての研究 推進薬破碎の圧力伝播特性

Study on Safety Evaluation of Propellant for Hybrid Rocket Engine Pressure Propagation Characteristics of Propellant Fracturing

○新國航希¹, 高橋晶世²*Kouki Nikkuni¹, Akiyo Takahashi²

In order to help evaluate the safety of hybrid rocket propellants, a liquid oxidizer and a solid fuel were used in a fragmentation experiment, and pressure-time histories and high-speed camera images were obtained. Comparison of each result showed that the peak and impulse increased when liquid oxidizer was used.

1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンは、相が異なる酸化剤と燃料に親和性がないことから他の化学ロケットエンジンに比べ爆発の危険性が少なく、安全性が高いものとされている。しかし、何らかの事故により固体燃料が粉じんになると、その粉じんが急速な燃焼を引き起こす可能性がある。従って、ハイブリッドロケットを安全に打ち上げるためには燃料の粉じん化と粉じん燃焼特性に配慮した安全評価基準が必要となる。ところが、既存の評価基準^[1]が提示する値は粉じん化に対する考慮が見られないばかりでなく、推進薬が限定されており、近年採用傾向のない材質が使用されている。そこで当研究室では爆風について、様々な材質に適用可能な安全評価方法の構築を目指して、ハイブリッドロケット事故を模したモデル作成に取り組んでいる。これまでに、複数の固体燃料材料について破碎実験を実施して、破片の粒度分布を取得した^[2]。

本研究では、より近年採用傾向の高い非爆発性ハイブリッドロケット推進薬の安全性を評価することを目的に破碎実験を行い、安全評価を行う。先行研究^[2]の中で、最も粉じん発生量が多かったマイクロクリスタリンワックス（以下 wax）を固体燃料として用いた。また、先行研究^[3]で酸素雰囲気化での実験を行った経験があることや、現在一般的に採用されていることから、液体酸素（以下 LOX）を液体酸化剤として用いた。

2. 実験装置及び方法

実験は、産業技術総合研究所の安全科学研究部門内にある爆発ドームにて実施した。破碎のため供試体に印加するエネルギーとして、C-4 爆薬と瞬発雷管を使用した。撮影には、高速度カメラ（SHIMADZU, HPV-X2）を使用した。圧力測定のために 2 本の圧力計（PCB

Piezotronics, 137A23）を使用した。それぞれの爆点から 1360 mm（換算距離 K=5）、2720 mm（K=10）の位置に設置した。供試体は液体酸素の上に wax を置きさらにその上に爆薬（21.6 g）を置き、それぞれ間にステンレス箔を挟んだ。供試体のセットアップを Figure 1 に示す。

カップに液体酸素を注ぎ、所定の質量になったら、雷管と爆薬で供試体を破碎する。実験条件と取得したピーク値を Table 1 に示す。

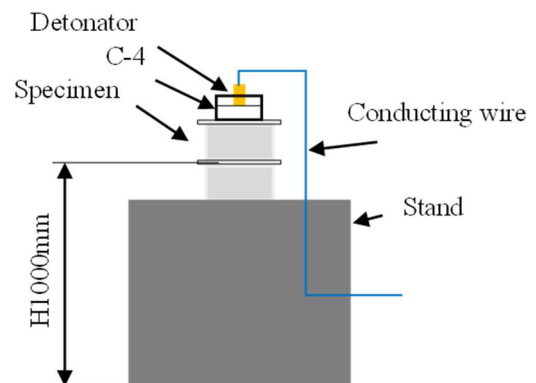


Figure 1. Schematic diagram of the specimen setup.

3. 実験結果及び考察

高速カメラで撮影した wax30 g の LOX 有り及び無しの画像を Figure 2 に示す。

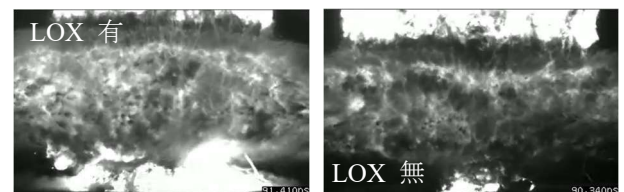


Figure 2. High speed camera image.

Figure 2 より LOX の有無に関わらず燃焼による発光が見られた。次に K=5 における圧力時間履歴の第一波

を比較した図を Figure 3 に示す. 今回使用した圧力データは, n2, n3, n5, n6, n9 及び n10 である.

Table 1. Experimental conditions.

NO.	wax, g	LOX, g	K=5 Peak overpressure, kPaG
n1	-	-	-
n2	20	30	34.2
n3	20	-	31.7
n4	-	-	48.3
n5	20	30	56.4
n6	20	-	33.1
n7	20	30	-
n8	60	30	-
n9	60	-	32.4
n10	60	30	47.8

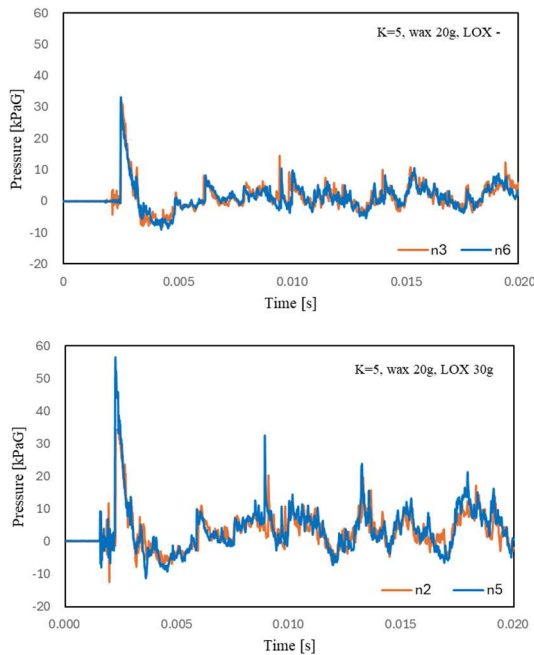


Figure 3-1. Pressure-time histories comparing by atmosphere.

Figure 3-1 より, 液体酸素有り (下) では, 無し (上) と比較して第一波のインパルス及びピーク値がともに高いことが分かった. また, Figure 3-2 より wax の質量を 60 g に増やした場合でも液体酸素有りでは, 無しと比較して第一波のインパルス及びピーク値がともに高く, ピーク値に到達する時間が早くなっていることが分かった, 従って, 液体酸素の有無が, インパルス, ピーク値, 圧力伝播速度にかかわっていることが確認できた. さらに, Figure 3-3 より液体酸素がある場合, wax 60 g では, 20 g と比較して第一波のインパルス及びピーク値がともに低いことが分かった.

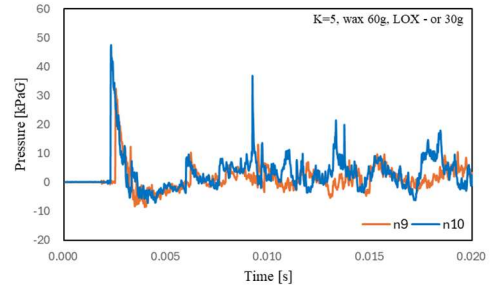


Figure 3-2. Pressure-time histories comparing by atmosphere.

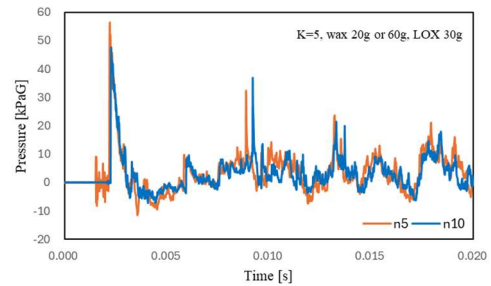


Figure 3-3. Pressure-time histories comparing by atmosphere.

4. 結論

圧力時間履歴の比較から液体酸素がある場合, インパルス, ピーク過圧値が大きくなること, 圧力伝播速度が高くなることが分かった. また, 高速度カメラの観察により LOX の有無にかかわらず激しい燃焼が発生していることが分かった. 今後は n5 と n10 のピーク過圧値を比較した際に wax の質量が増えてもピーク値が大きくなっていない原因の検討を行う. さらに, 今回の燃焼の TNT 換算率を検討する.

5. 参考文献

- [1] U.S.AirForce : AFMAN91-201, Explosive Safety Standards, 2011.
- [2] Takahashi, A. , Kitagawa, K., Shimada, T. : Evaluation of Safety Distance for Blast of Hybrid Rocket Propellants, AIAA 2019-3917, 2019
- [3] Takahashi, A. , Ishii, H. , Matsuzawa, H. : Study on safety evaluation of solid fuels for hybrid rocket engines, 2023

謝辞

本研究の実施に当たっては, 国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門爆発利用・産業保安研究グループの佐分利グループ長をはじめとする皆様に多大なご支援を賜り, 篤く御礼申し上げます.