

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 固体燃料破碎の圧力伝播特性 ($N_2 \cdot O_2$)

Study on Safety Evaluation of Solid Fuels for Hybrid Rocket Engines

Pressure Propagation Characteristics of Solid Fuel during Fragmentation (N_2, O_2)

○石井波哉斗¹, 松沢春輝¹, 高橋晶世²

*Hayato Ishii¹, Haruki Matsuzawa¹, Akiyo Takahashi²

To contribute to the safety evaluation of hybrid rocket propellants, fragmentation tests of solid fuel were conducted under an oxidizer atmosphere and nitrogen atmosphere, and pressure-time histories and high-speed camera images were acquired. Comparing the results of each oxidizer atmosphere, it is found that the peak and the impulse were increased when using the oxygen that has a supporting combustion property.

1. 研究背景

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。しかしながら、何らかの事故により固体燃料が粉じん化すると、その粉じんが急速に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]が提示する値は推進薬が限定されており、近年採用傾向のある材質には適していない。そこで当研究室では爆風について、様々な材質による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、複数の固体燃料材質について破碎試験を実施して、破片の粒度分布を取得した^[2]。その中で、最も粉じん発生量が多いマイクロクリスタリンワックス（以下 wax）を用いて、供試体周囲の雰囲気を変化させ破碎試験を実施し周囲の圧力変動と燃焼有無を調べてきた。その結果、雰囲気の違いにより燃焼が圧力変動に影響する可能性が示唆された^[3]。本研究では、雰囲気に窒素と酸素を採用し、同様の実験を行い酸素における燃焼の影響を明確にすることにした。

2. 実験装置及び方法

2-1. 実験装置

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。供試体は、先行研究と同じ wax を使用した。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。また、トリガーが押されてから発破するまでの時間を計測するために瞬発雷管にイオンギャップを取り付けた。破碎時の撮影には、カラー (PHOTORON LIMITED, SA-

Z) とモノクローム (SHIMADZU, HPV-X2) の2台の高速カメラを使用した。圧力測定のために3本の圧力計 (PCB Piezotronics, 137A23) を使用し、それぞれ爆点から 630 mm (換算距離 $K=5$), 1260 mm ($K=10$), 2520 mm ($K=20$) の位置に設置した。供試体のセットアップを Figure 1 に示す。

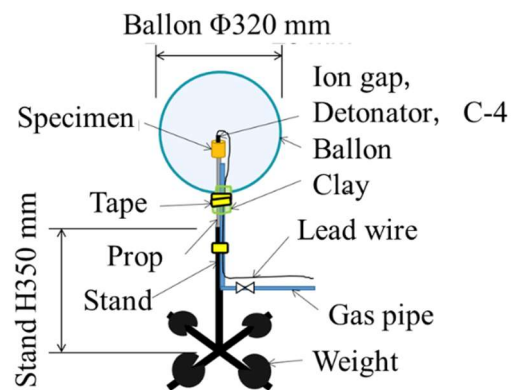


Figure 1. Schematic diagram of the specimen setup.

2-2. 実験方法

風船内に雰囲気気体を供給し、風船が所定の大きさになったら雷管と爆薬で供試体を破碎する。試験条件と取得したピーク値を Table 1 に示す。

3. 実験結果及び考察

モノクロカメラで撮影した供試体有, C-4 爆薬有の窒素及び酸素雰囲気の画像を Figure 2 に示す。

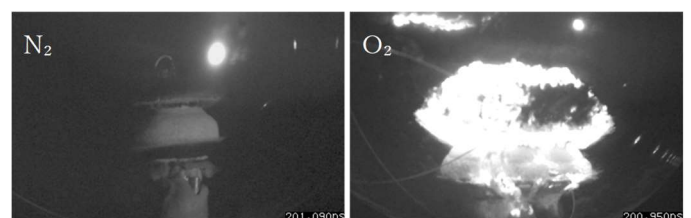


Figure 2. High speed camera image.

Table 1. Experimental conditions.

No.	Speciman	Gas	C-4 [g]	K=5 Peak overpressure [kPaG]
n1	wax	N ₂	2.014	-
n2	wax	N ₂	2.045	-
n3	wax	N ₂	2.033	39.03
n4	wax	N ₂	-	15.51
n5	-	N ₂	2.019	32.03
n6	-	N ₂	-	16.18
n7	wax	O ₂	2.012	44.54
n8	wax	O ₂	-	17.35
n9	-	O ₂	2.000	54.71
n10	-	O ₂	-	13.68

Figure 2 より，酸素雰囲気では強い発光が見られた。爆薬のアフターバーン，あるいは破砕で発生した粉じんが燃焼したものと考えられる。

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，n3，から n10 である。

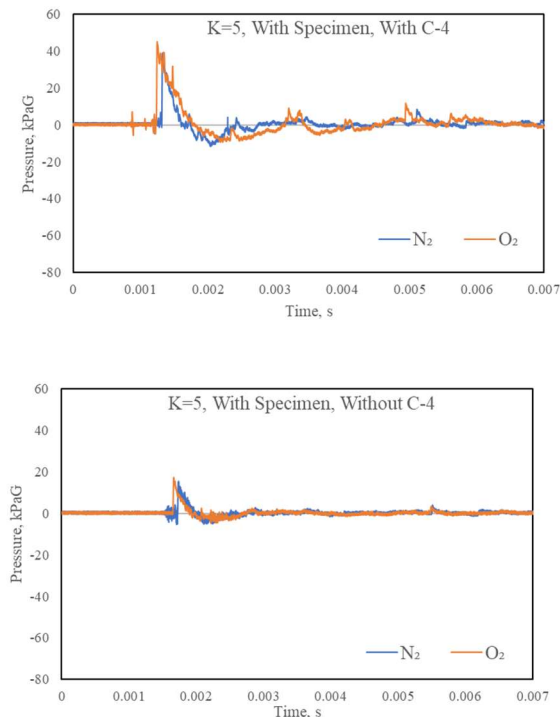


Figure 3-1. Pressure-time histories comparing by atmosphere.

Figure 3-1 より，C-4 爆薬有，無共に酸素雰囲気・供試体有では窒素雰囲気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。また，供試体無の場合を比較した Figure 3-2 より，爆薬有，無どちらもインパルスは酸素雰囲気の方が大きい。ピーク値を比較した場合，爆薬有では酸素雰囲気の方が大きく，爆薬無では窒素雰囲気の方が大きくなった。さらに，すべての条件で酸素雰囲気の方がピーク値に到達する時間が速

かった。従って，雰囲気の違いがピーク値，インパルス，圧力伝播速度にかかわっていることが確認できた。

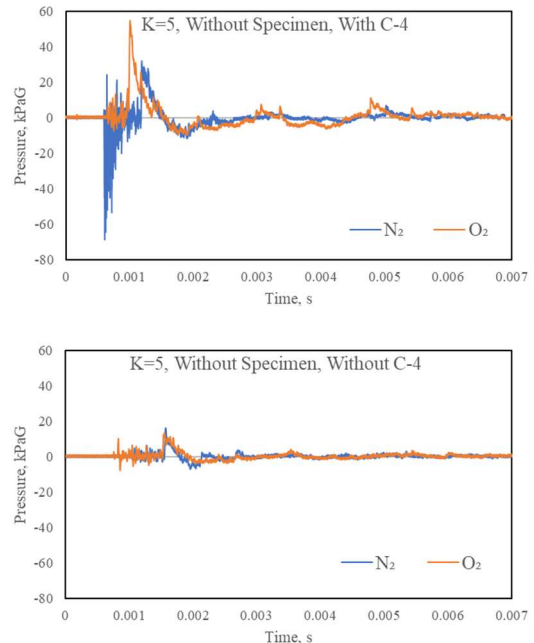


Figure 3-2. Pressure-time histories comparing by atmosphere.

4. 結論

圧力時間履歴の比較から酸素雰囲気では，圧力波がセンサ位置に到達する速度が高く，インパルスが大きくなることが分かった。また，高速度カメラの観察により酸素雰囲気では強い発光が確認でき，圧力波の変化に何らかの燃焼が関わっていることが確認できた。今後は，Figure3-2 の供試体無，C-4 無の条件下においてピーク値が他の条件と違った動きをした原因の検討を行う。また，より詳細にデータ解析を行っていくことで，今回の燃焼による 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. : The fragmentation test results for hybrid rocket fuels in an oxidizing atmosphere, 2021

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。