

K-29

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 酸化剤雰囲気下での固体燃料の破碎時における圧力伝播特性

Study on the Safety Evaluation of Solid Fuel for Hybrid Rocket Engines

Pressure Propagation Characteristics of Solid Fuel during Crushing in Oxidant Atmosphere

大出拓海¹, ○小笠原大虎¹, 坪倉慧昂¹, 高橋晶世², 高橋賢一²Takumi Ode¹, *Daigo Ogasawara¹, Subaru Tsubokura¹, Akiyo Takahashi², Kenichi Takahashi²

For the purpose of contributing to the safety of hybrid rocket propellants, fragmentation tests of solid fuel were conducted under an oxidizer 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. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンとは、一般的に固体の燃料と、液体あるいは気体の酸化剤を推進剤とするハイブリッドエンジンを用いた化学ロケットエンジンのことである。固体燃料として不活性な材質を採用できること、相が異なるため酸化剤と燃料に親和性がないことから、ハイブリッドロケットエンジンは、固体や液体ロケットエンジンに比べ、爆発の危険性が少なく、安全性の高いものとされている。しかし、燃料が何らかの衝撃で粉塵になってしまった場合には、粉塵が急速な燃焼を発生する可能性がある。従って、燃料粉塵化が破碎試験などで評価されてきた^[1-2]。その中で、昨年度は粉塵化した固体燃料の燃焼発生を検証するために、比較的粉塵化しやすいマイクロクリスタリンワックスを空気雰囲気下と酸素雰囲気下で破碎し、供試体周囲の圧力変化を測定し比較する取り組みが行われた^[2]。酸素雰囲気の時、空気と比較して圧力時間履歴のインパルス（過圧分の時間積分）が高い結果となった。しかしながら、酸素雰囲気では風船を使用した空気雰囲気では大気開放で試験を行ったため、圧力変動に対する風船破裂の影響が不明瞭であった。

そこで本実験では、風船の影響を排除し、酸素の影響を明確にするため、空気雰囲気下の際も風船を利用し、酸素雰囲気下の実験と条件を揃えて実験を行った。

2. 実験装置および方法

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。供試体はマイクロクリスタリンワックスである。破碎のために印加するエネルギーとして、精密雷管およびC-4爆薬を使用した。

破碎時の撮影には、カラーとモノクロの2台の高速度カメラを使用した。供試体をスタンドに設置した際の概略をFig.1に示す。供試体から630 mm, 1260 mm, 2520 mmの位置に圧力センサを設置し圧力時間履歴を取得した。

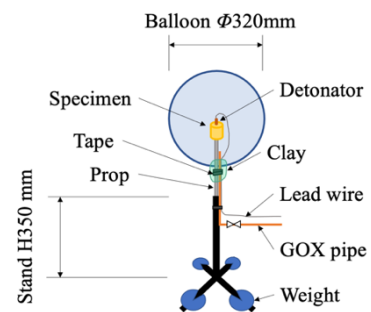


Figure 1. Schematic diagram of the specimen setup.

2.2. 実験方法

供試体周囲の雰囲気、供試体、C-4爆薬および雷管の有無をパラメータとした。爆薬を使用した全ての試験で、C-4爆薬2gを使用した。Table 1に本実験の実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

高速度カメラ（SHIMADZU HPV-X2）で撮影した酸素雰囲気下の画像（発破より約 3.62×10^{-5} μs）をFigure 2に示す。燃焼による発光が確認できる。



Figure 2. High speed camera image

Table 1. Experimental conditions (○ : with, × : without)

Date	No.	O ₂	Setup	Remark
8/30	n1	○	Explosive+Detonator	
	n2	×	Explosive+Detonator	
8/31	n1	×	Specimen+ Explosive+Detonator	
	n2	×	Specimen+ Explosive+Detonator	Non-explosion
	n3	×	Specimen+ Explosive+Detonator	
	n4	○	Specimen+ Explosive+Detonator	
	n5	×	Explosive+Detonator	Leak
	n6	×	Explosive+Detonator	

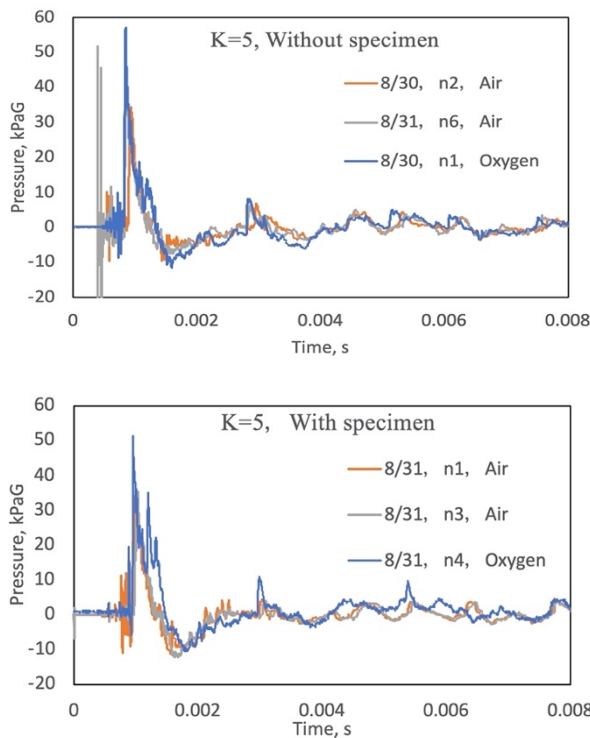


Figure 3. Pressure-time histories comparing by atmosphere

次に圧力時間履歴を比較する。まずは雰囲気下の比較を Figure 3 に示す。ただし、圧力波第一波のピーク値とインパルスの比較を容易にするために、立ち上がりのタイミングを合わせた。Figure 3 より、酸素雰囲気下の方がピーク値およびインパルスともに高い。ピーク値は、酸素雰囲気下で供試体なし (57.0 kPa) > 酸素雰囲気下で供試体あり (51.3 kPa) > 空気雰囲気下で供試体あり (33.8 kPa) > 空気雰囲気下で供試体なし (30.3 kPa) の順で高い。インパルスは酸素雰囲気下供試体あり (10.1×10^{-3} kPa · s), 酸素雰囲気下供試体なし (8.52×10^{-3} kPa · s) の順で高い。

次に、空気雰囲気下の風船有無の比較を Figure 4 に示す。Figure 4 より、風船の有無による違いは確認できなかった。従って、酸素雰囲気下で圧力波のピーク値やインパルスが上昇したことに対し、風船破裂による影

響はないと言える。

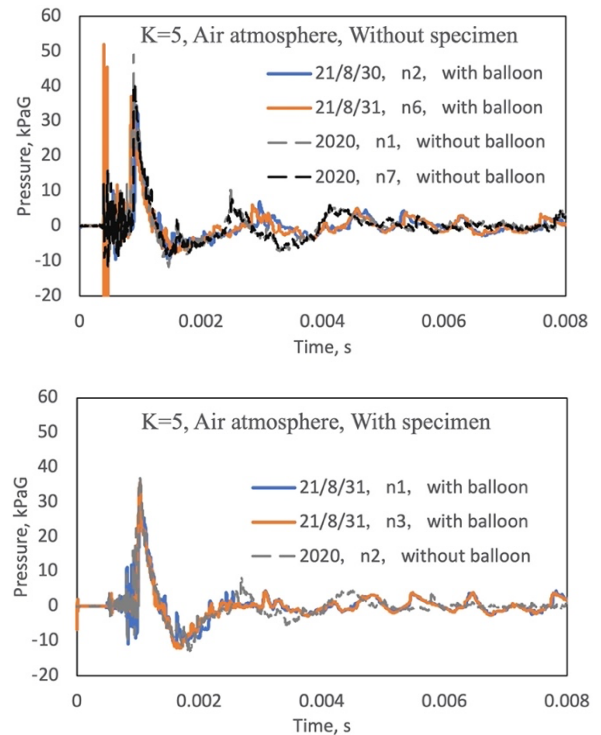


Figure 4. Pressure-time histories comparing by balloon

4. 結論

圧力時間履歴の比較から、酸素雰囲気の時、圧力波のピークおよびインパルスの上昇が見られた。高速カメラ画像から、燃焼が発生していることが確認できたため、酸素が持つ支燃性が影響したと考えられる。また圧力波の変化に対し風船の影響は無いことが確認された。今後は引き続きデータ解析を実施し、燃焼が圧力波の変化に寄与する機構について検討する。

5. 参考文献

- [1] 高橋晶世：「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」, 日本学術振興会, 19k15212, 2019-2021.
- [2] 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」, 日本学術振興会, 令和2年度日本大学理工学部卒業論文, 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久保田士郎グループ長をはじめとする皆様に多大なご支援を賜りました。また、当学科の金指和さん、斎藤亮さん、結城秀仁さんには供試体作成・寸法測定等に協力していただきました。厚く御礼申し上げます。