

## カルナウバワックスを利用したハイブリッドロケットの固体燃料に関する研究

## A Study on Solid Fuel for Hybrid Rockets Using Carnauba Wax

河野充希<sup>1</sup>, ○小林嵩峰<sup>1</sup>, 高橋賢一<sup>2</sup>Atsuki Kono<sup>1</sup>, \*Shuho Kobayashi<sup>1</sup>, Kenichi Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: Wax fuels are regarded as promising solid fuels for hybrid rockets due to their high regression rates and the entrainment effect, which enhances combustion efficiency. However, challenges remain, such as unburned residues caused by low viscosity and the sedimentation of additives. In this study, attention was focused on carnauba wax. Carnauba wax exhibits higher liquid-phase viscosity, which suppresses additive sedimentation and excessive droplet ejection during combustion. In addition, its lower melting point suggests the potential for higher regression rates. Based on these characteristics, carnauba wax is considered a strong candidate as a solid fuel for hybrid rockets. To evaluate its combustion characteristics, ignition tests were first conducted. The results showed that carnauba wax performed comparably to microcrystalline wax. Therefore, carnauba wax is suggested to have potential as a hybrid rocket fuel, though further experiments are required to confirm its applicability and optimize performance.

## 1. 研究背景

ワックスをハイブリッドロケットの固体燃料として用いる場合、いくつかの有利な特性が報告されている。第一に、燃料後退速度が大きいことである。例えばパラフィン系燃料は、HTPBと比較して約4倍の後退速度を示すことが明らかになっている<sup>[1]</sup>。第二に、エントレインメント現象が生じやすい点が挙げられる。燃焼時に液滴が飛散して酸化剤と混合しやすくなるため、本現象は燃焼挙動に重要な影響を及ぼす (Figure 1 参照)。

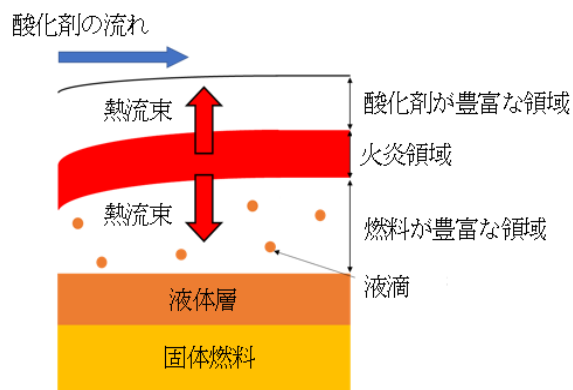


Figure 1. Model of boundary layer combustion

一方で、ワックス系燃料には以下のような欠点も存在する。第一の欠点は大量の残渣が発生することである。ワックスは熔融時の粘度が低いため液滴が過度に飛散し、燃焼室内に未燃焼の燃料が残留しやすい。第二に、機械的性質に課題がある点である。ワックスは

脆弱で破損しやすく、大型の固体燃料製作に際して構造的な制約を受ける。第三に、添加物の沈殿が挙げられる。熔融したワックスにワックスより密度の大きい添加物を混合した場合、粘度が低いために凝固するまでの間に添加物が沈降しやすく、結果として組成の偏った固体燃料が形成される。

これらの課題に対する改善策として、本研究ではカルナウバワックス (Carnauba) の採用を検討する。Carnauba の利点として、まず熔融状態での粘度が比較的高いことが挙げられる。粘度が高いことで、添加物の沈降や燃焼中の液滴の過剰な飛散を抑制できる可能性がある。次に、使用中のマイクロクリスタリンワックス (WAX) に比べて融点が低いことも利点である。現在研究室で主に使用している WAX の融点は約 110°C であるのに対し、Carnauba は約 80–86°C と報告されており、これにより燃料後退速度の改善が期待される。

以上の背景を踏まえ、本研究では Carnauba をハイブリッドロケットエンジンの固体燃料として実用可能か検討するため、着火特性を中心に評価を行う。

## 2. 実験概要

本実験では、ハイブリッドロケットエンジンの燃焼室内を簡易的に再現した電気炉内で、固体燃料を着火させ着火遅れ時間、燃焼時間を測定する。まず、電気炉内に設置したステンレスカップ内部の温度が 450°C になるように予熱する。その後、試料を投入し、鏡に映った炉内の燃焼の様子をカメラで撮影した。

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

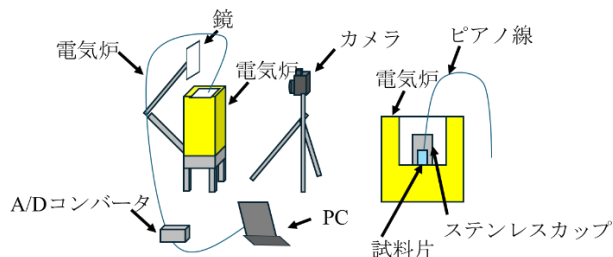


Figure 2. Ignition test equipment

試料は Carnauba および WAX を原料として用い、Figure 3 に示すように直径 6 mm、高さ 6 mm の円柱形状に成形したものをを用いた。

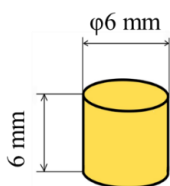


Figure 3. Sample

3. 結果及び考察

Carnauba と WAX それぞれの 450°Cでの着火遅れ時間を Figure 4、燃焼時間を Figure 5 に示す。また、得られた全てのデータの平均値を Table 1 に示す。

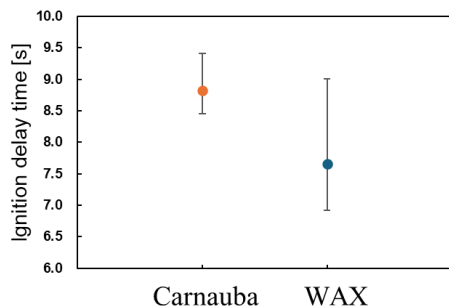


Figure 4. Results of ignition delay time

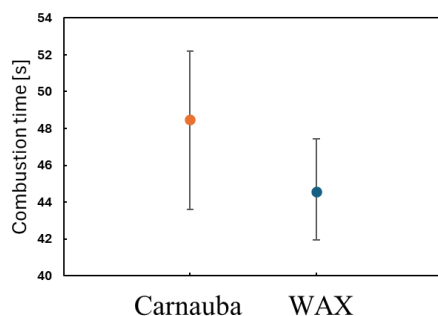


Figure 5. Results of combustion time

Table 1. Average combustion properties of Carnauba and WAX

	着火遅れ時間[s]	燃焼時間[s]
Carnauba	8.83	48.47
WAX	7.66	44.56

Figure 4, Figure 5 および Table 1 に示す結果から、Carnauba の着火遅れ時間は 8.83 s で WAX の 7.66 s より 15.27%増加し、燃焼時間は 48.47 s で WAX の 44.56 s より 8.78%増加したことが分かった。この要因の一つとして、Carnauba の主成分である高級脂肪酸エステルが影響していると考えられる<sup>[2]</sup>。高級脂肪酸エステルは熱を加え、着火するまでの過程が長く、まず加熱による溶融後に高粘度の液膜を形成し、その後エステル結合が切断されて酸・アルコール・オレフィンなどの揮発性生成物が生成される過程を経て着火する<sup>[3]</sup>。この過程が長時間を要することが、Carnauba の着火遅れ時間および燃焼時間の増大につながったと考えられる。

さらに、Carnauba は結晶性が高いため、溶融時に試料表面が滑らかな皮膜を形成しやすく、内部のガスが外部へ放出されにくくなり、可燃性蒸気の発生が遅延し、結果として着火遅れ時間に影響を及ぼしたと考えられる。

4. 結言

Carnauba は、WAX より着火遅れ時間、燃焼時間ともにわずかながら長い時間を示しており、本研究の範囲ではやや劣る性能を示した。しかし、今回の実験範囲では差異は許容範囲であり、WAX の代替として使用可能であると考えられる。

1. 参考文献

[1] Karabeyoghu, M. A., Altman, D., and Canwell, B. J. 2002. Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory Journal of Propulsion and Power pp. 610-620

[2] Trease, G. E., Evans, W. C. : Trease and Evans Pharmacognosy, 16th Edition, Saunders/Elsevier, pp. 434-439, 2009.

[3] Craig, R. G., Powers, J.M., Peyton, F.A. "Thermogravimetric Analysis of Waxes, " Journal of Dental Research, Vol. 50, No. 2, pp. 450-454, 1971.