

バイオ燃料を添加したハイブリッドロケット用 WAX 系固体燃料に関する研究

西村勇介*1, 高橋晶世*2, 高橋賢一*2

*1 日本大学大学院理工学研究科, *2 日本大学

Study on WAX-based Solid Fuels for Hybrid Rockets with Biofuels Addition

Yusuke Nishimura*1, Akiyo Takahashi*2, Kenichi Takahashi*2

*1 Graduate School of Science and Technology, Nihon University, *2 Nihon University

1. 序論

ハイブリッドロケットエンジンは、気体または液体の酸化剤を固体燃料のある燃焼室に噴霧し燃焼させる方式のロケットエンジンである。酸化剤には酸素、過酸化水素、亜酸化窒素などが用いられ、固体燃料には末端水酸基ポリブタジエン、ポリエチレン、パラフィンワックスなどが用いられる。液体ロケットと比べエンジンの構造が簡単で低コストであることや、燃料と酸化剤を異なる相で搭載していることから酸化剤と燃料が混合しても爆発のリスクが低く安全性が高いなどの特徴がある。ハイブリッドロケットは安全性が高く低コスト化が期待できることから小型ロケットとしての利用が待望されている。しかし、ハイブリッドロケットの固体燃料は石油由来であることが多く、打ち上げ回数が多くなれば資源の枯渇と二酸化炭素の排出による環境への負荷が懸念される。そこで我々は固体燃料にバイオ燃料を使用することで環境負荷の低減を図りたいと考えた。安価で手に入れやすいバイオ燃料の候補として、セルロースやポリ乳酸 (PLA) などがある。本研究では主剤に混合して燃料を製作する手法に適したセルロースとグルコースを採用した。セルロースの特徴として、燃料としての利用が可能なこと、強度強化剤としての役割があること、安価で手に入れやすいことが挙げられる。本研究で使用するセルロースは、一般的な粉末セルロースより純度が高い微結晶セルロースである。多くの糖類がグルコースを含む単糖類から構成されており、セルロースもグルコースから構成されている。本研究で使用するグルコースは、一般的な粉末のグルコースを使用する。燃料の主剤には他のパラフィン等と比較して融点が高く、韌性に優れ、熱収縮が比較的少ないマイクロクリスタリンワックスを用いることとした。

本研究では、着火実験および燃焼実験より、バイオ燃料を

添加したときのマイクロクリスタリンワックス（以下 WAX と表記）の着火特性および燃焼特性を調査する。そして、バイオ燃料による WAX の一部代替を検討する。

本研究のアプローチは以下の通りである。

- 理論計算による WAX へのセルロース及びグルコース混合量の設定。
- 着火実験による着火特性評価。
- 燃焼実験による燃焼特性評価 (セルロースのみ実施済み)。

2. 実験

2.1 実験試料

実験で使用した WAX とバイオ燃料の諸元を Table 2.1-2.3 に示す。

Table 2.1 Properties of microcrystalline wax (WAX).

Trade name	Hi-Mic-2095
Supplier	Nippon Seiro Co., Ltd.
Density [kg/m ³]	780 ^[1]
Melting point [°C]	101 ^[1]
Flash point [°C]	310 ^[1]
Heat of formation [kJ/mol]	-1087.4

Table 2.2 Properties of cellulose powder.

Trade name	Microcrystalline cellulose
Supplier	Nippon garlic Corp.
Density [kg/m ³]	1500 ^[2]
Melting point [°C]	265 ^[2]
Flash point [°C]	254 ^[2]
Average particle size [μm]	29
Heat of formation [kJ/mol]	-970 ^[3]

Table 2.3 Properties of glucose powder.

Trade name	Glucose
Supplier	Margo Corp.
Density [kg/m ³]	1540 ^[4]
Melting point [°C]	146 ^[4]
Flash point [°C]	287 ^[4]
Average particle size [μm]	82
Heat of formation [kJ/mol]	-1035 ^[4]

セルロース粉末とグルコース粉末の平均粒径は、走査電子顕微鏡で撮影した画像より測定した。

2.2 電気炉を用いた着火実験

2.1 で述べた実験試料を用いて供試体を製作した。WAX に添加するセルロース粉末またはグルコース粉末の割合は、NASA-CEA^[5]による理論計算の結果から推進性能を考慮し、添加量を 10 ~ 40 mass% とした。本実験では、WAX 単体 (0 mass%) 及び WAX にセルロースまたはグルコースを 10, 20, 30, 40 mass% 添加した供試体を製作する。供試体の形状は、直径 6 mm、高さ 6 mm の円筒形である。供試体は WAX にセルロースまたはグルコースを添加したものを溶かし、溶かしたものをシリコン製の型に流し込み、冷やし固めるという方法で製作した。

実験装置の概略図を Fig. 2.1 に示す。

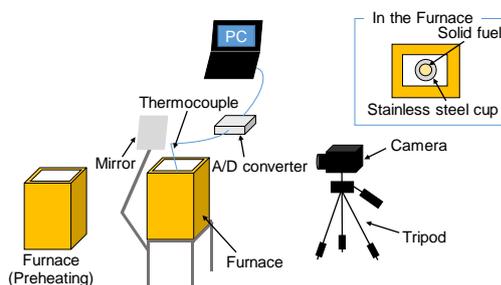


Fig. 2.1 Conceptual diagram of experiment apparatus.

Fig. 2.1 に示すように、加熱した電気炉内にあるステンレスカップに供試体を投入し、着火実験を行った。電気炉内の様子は鏡を通してカメラで記録した。撮影した動画より、供試体の熔融時間、着火遅れ時間、燃焼時間を測定した。ここで熔融時間とは供試体がカップに落ちた瞬間から溶けるまで

の時間、着火遅れ時間とは供試体がステンレスカップに落ちた瞬間から着火するまでの時間であり、燃焼時間とは供試体が着火した瞬間から火炎が消えるまでの時間と定義した。着火実験は、セルロース添加時とグルコース添加時のそれぞれにおいて、5 種類の添加量 (0, 10, 20, 30, 40 mass%) で実験を行った。

2.3 ハイブリッドロケットエンジンを用いた燃焼実験

2.1 で述べた実験試料を用いて固体燃料を製作した。本実験では、セルロースを添加したもののみ実験を行った。セルロースの添加量は、着火実験の結果から 30 mass% 以下とする。燃焼実験で使用する固体燃料を Fig. 2.2 に示す。



Fig. 2.2 The size of solid fuel.

固体燃料の形状は、外径 40 mm、内径 14 mm、長さ 100 mm の円筒形である。固体燃料は、WAX にセルロースを添加したものを溶かし、溶かしたものをアクリル製の円筒形の型に流し込み、型を円周方向に回転させながら冷やし固めるという方法で製作した。

実験に使用したハイブリッドロケットエンジンの概略図を Fig. 2.3 に示す。

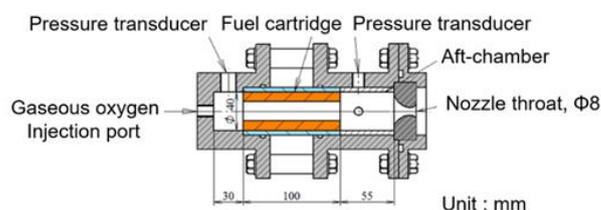


Fig. 2.3 Combustion experiment apparatus.

スロート径が 8 mm のノズルを使用する。酸化剤には気体酸素を使用する。実験条件として、酸化剤質量流束は 17 ~ 20 g/s、燃焼時間は 5 s とする。燃焼実験では、燃料質量流量と特性排気速度を測定する。また、ノズル出口をカメラで撮影し、火炎の様子を確認する。本実験では、WAX 単体 (Cellulose

0), セルロース添加量 10 mass% (Cellulose 10), セルロース添加量 20 mass% (Cellulose 20) の 3 種類で実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 電気炉を用いた着火実験

Fig. 3.1 に着火遅れ時間のセルロース添加量変化を示す。

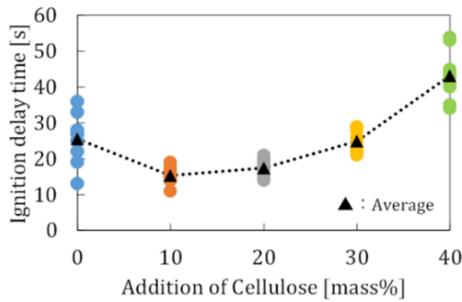


Fig. 3.1 Results of ignition delay time (cellulose).

Fig. 3.1 より, 着火遅れ時間はセルロースの添加量増加に伴い増加していることが分かる。また, 着火遅れ時間は 30 mass%までの範囲では WAX と同等かそれより短いことが分かる。

Fig. 3.2 に燃焼時間のセルロース添加量変化を示す。

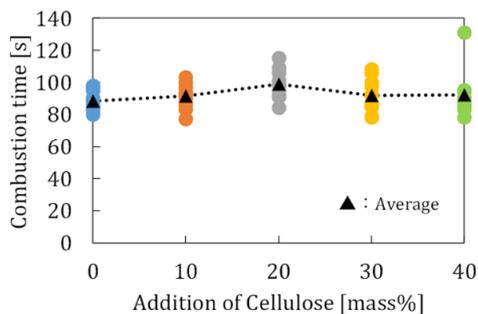


Fig. 3.2 Results of combustion time (cellulose).

Fig. 3.2 より, セルロースを添加したことによる燃焼時間の変化はほとんど見られなかった。

以上より, WAX にセルロースを 30 mass%までの範囲で添加することは燃料の着火特性に影響をほとんど与えないと考えられる。

次に, グルコースの着火実験の結果について述べる。Fig. 3.3 に着火遅れ時間のグルコース添加量変化を示す。

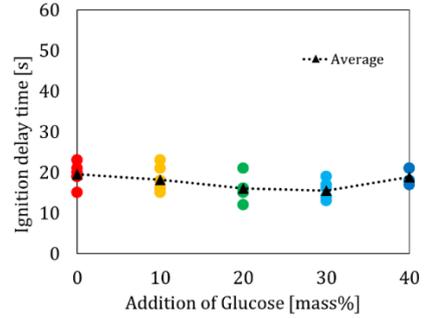


Fig. 3.3 Results of ignition delay time (glucose).

Fig. 3.3 より, グルコースを添加したことによる着火遅れ時間の変化はほとんど見られなかった。

Fig. 3.4 に燃焼時間のグルコース添加量変化を示す。

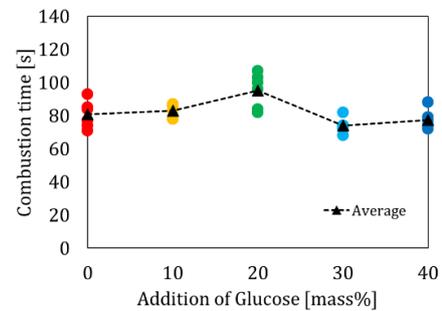


Fig. 3.4 Results of combustion time (glucose).

Fig. 3.4 より, グルコースを添加したことによる燃焼時間の変化はほとんど見られなかった。

以上より, WAX にグルコースを 40 mass%までの範囲で添加することは燃料の着火特性に影響をほとんど与えないと考えられる。

3.2 ハイブリッドロケットエンジンを用いた燃焼実験

Fig. 3.5 に燃料質量流量の O/F に対する変化を示す。

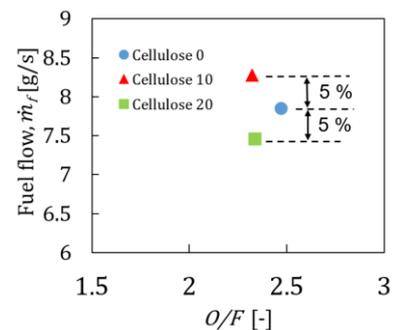


Fig. 3.5 Fuel flow vs. O/F .

Fig. 3.5 より、セルロースを添加したときと WAX 単体のときの燃料質量流量の違いは 5% である。このことから、セルロースの添加による燃料質量流量への影響はほとんどないと言える。

Fig. 3.6 に特性排気速度の O/F に対する変化を示す。

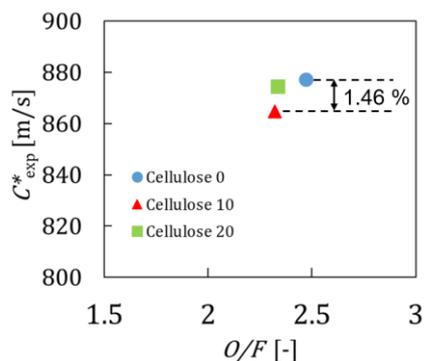


Fig. 3.6 Characteristic velocity vs. O/F .

Fig. 3.6 より、セルロースを添加したときと WAX 単体のときの特性排気速度の違いは 1.46% 以下である。このことから、セルロースの添加による特性排気速度への影響はほとんどないと言える。

Fig. 3.7 にノズル出口における火炎の様子を示す。

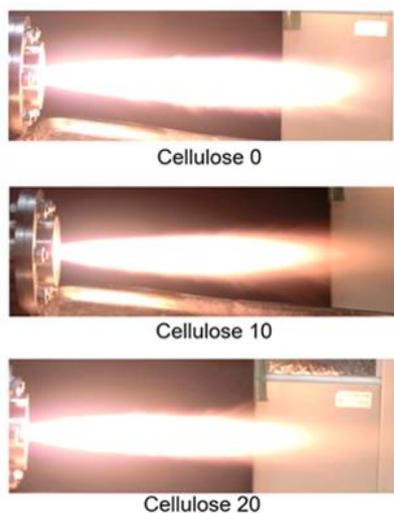


Fig. 3.7 State of the flame at the nozzle exit.

Fig. 3.7 より、ノズル出口における明確な火炎の色の違いは見られなかった。このことから、セルロースの添加による火

炎の温度に変化はないと考えられる。

4. 結論

- WAX にセルロースまたはグルコースを添加することによる燃料の燃焼時間への影響はほとんどない。
- WAX にセルロースを 30 mass% までの範囲で添加することによる燃料の着火特性への影響はほとんどない。
- WAX にグルコースを 40 mass% までの範囲で添加することによる燃料の着火特性への影響はほとんどない。
- セルロースの添加による燃料質量流量及び特性排気速度への影響はほとんどない。
- セルロースの添加による影響をさらに調査するため、添加量 30 mass% 及び低 O/F における燃焼実験の実施が必要と言える。
- グルコースを添加したときの WAX の燃焼実験が必要と言える。

参考文献

- [1] 日本精蝋株式会社, 安全データシート, Hi-Mic-2095, M-21, 2017 年 4 月 1 日.
- [2] National Library of Medicine, PubChem, Deae-cellulose, Chemical and Physical Properties, 2022 年 2 月 27 日, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/CELLULOSE#section=Chemical-and-Physical-Properties>.
- [3] Michael Ioelovich : Study of thermodynamic properties of various allomorphs of cellulose, CHEM XPRESS 9 (3) , 259-265, 2016, p 263.
- [4] Chemeo, Chemical Properties of Glucose, Physical Properties, 2022 年 2 月 27 日, <https://www.chemeo.com/cid/33-990-6/Glucose#ref-joback>.
- [5] S. Gordon and B. J. McBride : Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, NASA Reference Publication 1311, 1996.