

K7-44

WAX 火炎中での金属粉末の燃焼に関する研究 Study on the Combustion of Metal Powder in the WAX Flame

○和地宏隆¹, 山崎雄太¹, 高橋晶世², 高橋賢一²* Hiroataka Wachi¹, Yuta Yamazaki¹, Akiyo Takahashi², Kenichi Takahashi²

Abstract: We try to improve the regression rate by adding metal powder. However, previous research doesn't confirm the ignition of metal powder. Therefore, we study the combustion characteristic of the metal powder in the WAX flame. We perform the experiment in the electric furnace. This paper evaluates ignition delay time of the metal powder and compares our experiments with previous research. We consider the difference between the electric furnace and chamber of our rocket motor.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットは一般的に固体燃料と液体または気体の酸化剤を別々に搭載している。それらを燃焼室内で混合し燃焼させ推力を得ているため安全性が高く、再着火や推力制御が可能である。さらにハイブリッドロケット用固体燃料は一般に取り扱いが容易であり反応生成物に劇物を含まず環境負荷が低い。これらの理由でハイブリッドロケットは活発に研究されている。^[1]

しかし、現在運用されている化学ロケットと比べ推力が低いため実用化された例は少ない。推力が低い原因の一つとして燃料後退速度の低さがある。それを改善するために固体燃料に金属粉末の添加や高エネルギー物質を添加する研究がなされてきた。^{[2][3]}固体燃料中の金属粉末の着火によって燃焼温度が上昇し、これにより燃料後退速度の改善が見込まれている。

ところが既往研究の燃焼試験では金属粉末の不着火により期待された燃料後退速度に達していない。^[4]

NASA-CEA で当量比 1, 1atm 定圧断熱条件の解析結果より本実験における WAX 固体燃料の断熱火炎温度は 2503 K であり、本研究の既存の研究で用いられている燃焼器のチャンバー内温度は O/F=1 を超えれば断熱火炎温度よりも高くなる。よって本実験で着火すれば、燃焼試験における温度に関する着火条件は満たされているといえる。

本実験では、電気炉内を燃焼試験のチャンバー内と模擬し、実際に WAX 燃料の火炎で金属粉末が着火するかを調査する。さらに Al や Mg といった金属粉末の着火位置および着火遅れについて評価し燃焼試験で燃料後退速度の改善を目指す。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

実験に使用した WAX と金属粉末の諸元を以下に示す。

1. マイクロクリスタリンワックス (WAX)
型番:Hi-Mic-2095
融点:101 °C
密度:780 kg/m³ (120°C)
2. Al 粉末
平均粒径:3 μm
純度:99.8%以上 99.9%未満
密度:2700 kg/m³ (20°C)
3. Mg 粉末
平均粒径:75 μm

実験装置の全体図を Figure1 に示す。

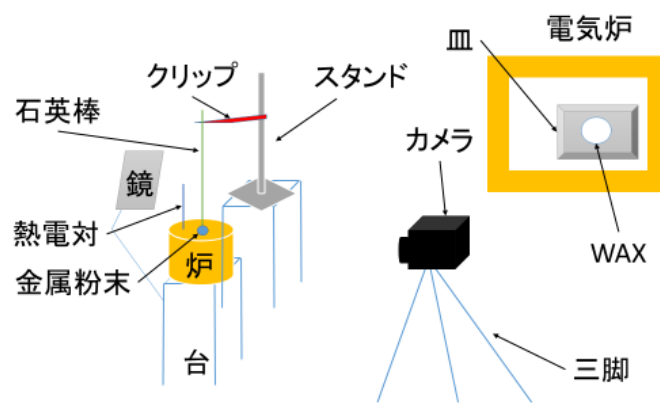


Figure 1. Test equipments

2.2 実験方法

本実験では燃焼試験中のチャンバー内を簡易的に再現した電気炉内で WAX を着火させ、その WAX 火炎中に金属粉末を接着した石英棒を挿入することで金属粉末の着火遅れを調査する。着火遅れはカメラのハイスピードモード(1000fps)で撮影した動画か

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

ら計測する。着火位置は電気炉内の耐熱皿から石英棒の先端までの距離とし、着火遅れは石英棒が着火位置に到達してから着火するまでの時間とした。

3. 実験結果及び考察

金属粉末の着火の様子を Figure 2, 3 に示す。

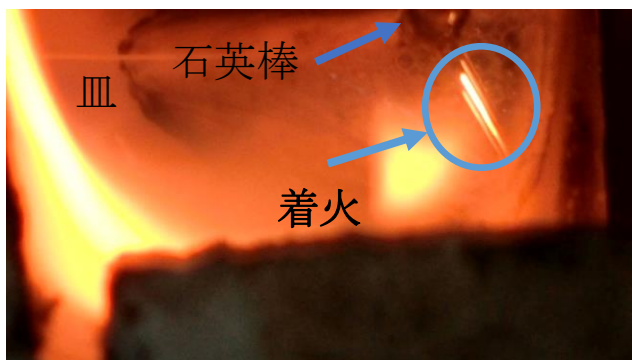


Figure 2. Ignition of Al powder

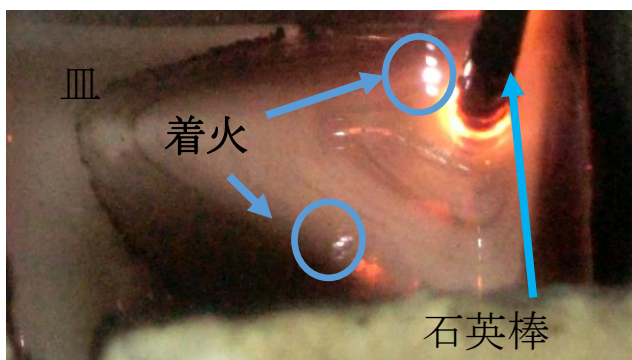


Figure 3. Ignition of Mg powder

また着火遅れ時間と着火位置を Table 1, 2 に示す。

Table 1. Ignition distance from the bottom of furnace

	Al	Mg
1 回目 [mm]	5	5
2 回目 [mm]	10	5
3 回目 [mm]	10	0

Table 2. Ignition delay time

	Al	Mg
1 回目 [s]	1.65	1.56
2 回目 [s]	1.26	1.02
3 回目 [s]	2.16	0.54

Figure 2, 3 より Al と Mg の着火の様子がわかる。Al と Mg を比べると、Al は小さい炎が棒の先端から落ちていくのに対し Mg は白い光が激しく上がる。

Table 1 よりそれぞれの金属粉末の着火位置については 5 mm 離れた位置での着火が確認されている。

着火遅れに関しては Table 2 よりチャンバー内の燃焼ガスの滞留時間が数 ms のオーダーであるのに対し、Al, Mg の着火遅れは 0.5 s ~1.65 s であり長い。本実験では炉内に充填された気体が空気であったが、燃焼試験では酸素なので着火遅れが改善されることが期待できる。

本実験では電気炉内の気体は空気であったが金属粉末が着火しているため、金属粉末の滞留時間を延長させることができればアルミニウム粉末の燃焼試験での着火が見込まれる。さらにマグネシウム粉末は、着火遅れがアルミニウム粉末と比較して短いため、今後マグネシウム粉末を添加した固体燃料を用いることでハイブリッドロケット用固体燃料のさらなる燃料後退速度の向上が見込まれる。

4. 結論

- Al, Mg 粉末ともに着火した。
- 着火位置は境界層燃焼の火炎との距離を再現できている。
- Mg 粉末の着火遅れは Al 粉末よりも短い。
- チャンバー内の滞留時間を数 s のオーダーにすれば燃焼試験でも性能向上が期待される。

5. 参考文献

- [1]Chiaverini, M. ,Kuo, K.: Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 218, 2007.
- [2] Carmicino, C., Sorge, A. R.:“Experimental Investigation into the Effect of Solid-Fuel Additives on Hybrid Rocket Performance” ,Journal of Propulsion and Power 31: 699–713 (2015).
- [3] Pal, V. Kumar: “Physical and Ballistic Characterization of Aluminum-Loaded Paraffin Hybrid Rocket Fuels”, Energy & Fuels, 31,10133–10143, 2017
- [4]Komori, Takahashi: “Combustion Characteristics of Adding Micro-sized Aluminum Powder to WAX-based Hybrid Rocket Fuel by Using Axial and Swirl Flow” Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University master’s thesis, 2017 in Japanese