

K-43

Mg-Al 粉末添加による WAX 系ハイブリッドロケット固体燃料の高性能化 Improving performance of WAX-based hybrid rocket solid fuel with adding Mg-Al powder

○及川浩慶¹, 久保田舞¹, 竹川兼生¹, 高橋賢一²*Hironori Oikawa¹, Mai Kubota¹, Kensei Takegawa¹, Kenichi Takahashi²

Abstract: Mg-Al powder is used as a metal fuel for AP composite propellants. This is because Mg-Al powder is easier to ignite than Al powder and has a higher burning rate. Based on this knowledge, we think it is possible to improve the reverse regression rate. In this study, an experiment was conducted with the aim of evaluating the ignition characteristics of the fuel added with Mg-Al. As a result, ignition delay time and combustion time decreased compared to WAX alone.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットは、固体燃料と液体や気体の酸化剤を組み合わせたロケットである。これらはそれぞれ別のタンクに充填されるため爆発の危険性が少ない。また、固体燃料に樹脂等、酸化剤は酸素や亜酸化窒素が用いられるため、取り扱いが容易で劇物を含まず低環境負荷であり、さらに安価といった特徴がある。したがって、宇宙輸送に用いる推進システムとして注目されている。しかし、大推力化が難しいため、実用化された例は少ない。その原因は燃料後退速度の低さである。この問題を解決するために、固体燃料に金属粉末や高エネルギー物質を添加する研究が行われている。これにより、燃焼温度が上昇し、燃料後退速度を向上させる効果が見込まれる。

Mg-Al 粉末は、国内でも入手性が比較的に良く、価格も安価である。また、Mg 粉末による着火性の良さと、Al 粉末による高い発熱量を有する。さらに、Al 粉末や Mg 粉末と比べ融点や着火温度が低く、燃焼速度が大きい特徴がある。^{[1][2]}

固体推進薬の場合、燃焼特性を示す代表的な値は線燃焼速度である。Mg-Al 固体推進薬の場合、燃焼速度は Al 系の固体推進薬より、40%程高い値を示す。^[2]

本研究では、ハイブリッドロケット用のマイクロクリスタリンワックス (WAX) を主剤とした固体燃料に金属粉末の Mg-Al 粉末を添加した際の WAX 系固体燃料の着火遅れ時間と燃焼時間から、着火特性を評価する。

2. アプローチ

NASA-CEA^[3]を用いて、Mg-Al 粉末を添加した WAX 系固体燃料の性能を評価した。計算条件は、定圧断熱条件で温度 20 °C、圧力 5 atm、開口比 1.35、O/F 比 1.5 とし、固体燃料は WAX (C₄₄H₉₀) とした。評価した結果

を Figure 1 に示す。ここで、 C^* は特性排気速度とする。

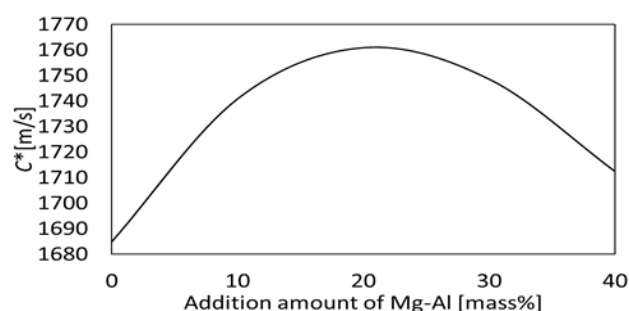


Figure 1. Theoretical calculation results

Figure 1 より、本実験では WAX 単体と Mg-Al 粉末を 10 mass%, 20 mass%, 30 mass% 添加した WAX とを比較する。作成した試料の組成を Table 1 に示す。

Table 1. Composition of sample

Sample name	WAX [mass%]	Mg-Al [mass%]
Mg-Al0	100	0
Mg-Al10	90	10
Mg-Al20	80	20
Mg-Al30	70	30

3. 実験装置及び実験方法

3.1 実験装置

本実験で使用した WAX と Mg-Al 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 (日本精蠟株式会社)

型番: Hi-Mic-2095

融点: 101 °C

密度: 780 kg/m³ (120 °C)

(2) Mg-Al 粉末 (株式会社関東金属)^[4]

平均粒径: 75 μm

融点：650 °C

かさ密度：1.2~1.4 g/cm³

溶融した WAX に Mg-Al 粉末を混合させ、攪拌する。攪拌した WAX を型に流し詰め、直径 6 mm、高さ 6 mm の試料を製作した。実験装置の全体図を Figure 2 に示す。

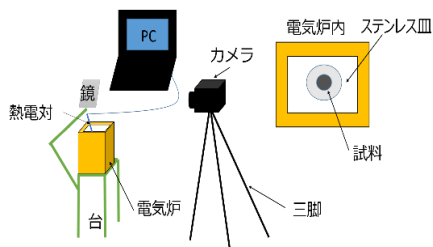


Figure 2. Test equipments

3.2 実験方法

本実験では、ハイブリッドロケットエンジン内を簡易的に再現した電気炉内で試料を着火させ、その時の温度、試料の着火遅れ時間と燃焼時間を調査する。温度計測には熱電対を用いた。時間はカメラで撮影した動画から計測した。

4. 実験結果および考察

Mg-Al10, Mg-Al30, の着火時の画像を Figure 3 と Figure 4 に示す。

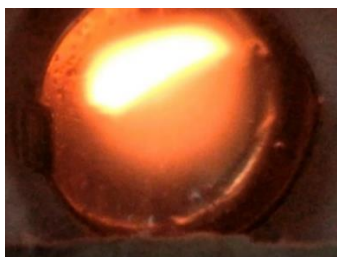


Figure 3. State of combustion flame (Mg-Al10)

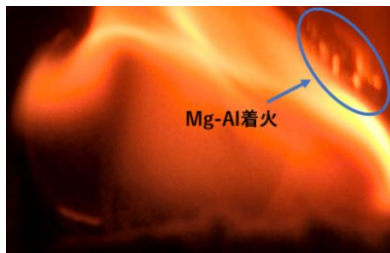


Figure 4. State of combustion flame (Mg-Al30)

Figure 3 と Figure 4 より Mg-Al10 に比べ、Mg-Al30 の方が火炎が大きくなり、Mg-Al 粉末が着火し火花を散らせながら燃焼した。

Mg-Al10~30 の着火遅れ時間と燃焼時間のグラフを Figure 6 と Figure 7 に示す。

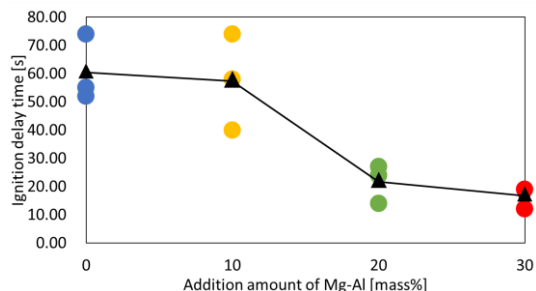


Figure 6. Result of ignition tests

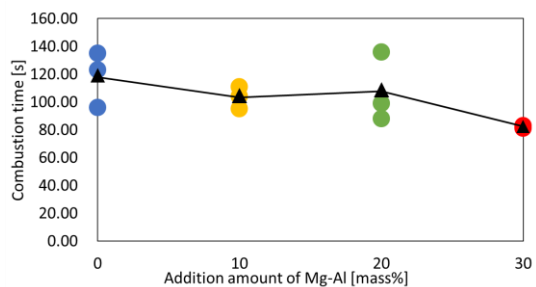


Figure 7. Result of combustion tests

Figure 6 より、着火遅れ時間は Mg-Al30 が最も短く、Mg-Al10 と比べ 44 秒短くなった。Figure 7 より、燃焼時間も 36 秒短くなっている。これは、Mg-Al 粉末を添加することで熱伝導率が向上し、融点や引火点に早く達したと考えられる。しかし試料を手動でステンレス皿に入れる際、かかる時間によって計測時間にも影響すると考えられるため、精度を高めるには実験手順の改良が今後の課題である。

4. 結論

WAX に Mg-Al 粉末の添加をすることで、WAX 単体に比べ着火遅れ時間と燃焼時間が減少した。よって、ハイブリッドロケット用固体燃料として燃料後退速度の向上が期待できる。

5. 参考文献

[1] 火薬学会：プロペラント・ハンドブック，火薬学会プロペラント専門部会編，2005，pp.279-284.
 [2] 羽生宏人：マグナリウムの固体ロケット推進薬への適用，軽金属 第 58 巻第 4 号，162-166, 2008.
 [3] S. Gordon and B. J. McBride: Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. NASA Reference Publication 1311, 1996.
 [4] 株式会社関東金属：製品安全データシート，2010.