

ハイブリッドロケットエンジンにおけるボロン粉末とマグナリウム粉末を 添加した固体燃料の推進性能の評価

Evaluation of Propulsive Performance of Solid Fuels with Boron and Magnalium Powders in Hybrid Rocket Engines

○大久保滯¹, 中島智央¹, 高橋賢一²*Mio Ookubo¹, Chihiro Nakasima¹, Kenichi Takahashi²

Abstract: Boron powder has a high combustion heat, but the oxide film makes it difficult to ignite and maintain combustion. To solve this, we came up with a method to remove the oxide film by burning it simultaneously with magnalium powder. In this study, experiments were conducted to evaluate the ignition characteristics of solid fuels with boron and magnalium powders added. At this time, two types of sintered and mixed products were compared. Because we thought that sintering would cause the boron and magnalium to closely bond and increase combustion completion. As the result, the addition of boron and magnalium powders reduced the ignition delay time and combustion time. However, we need to improve the method using sintered powder.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットは、固体燃料と液体酸化剤を推進剤とする化学ロケットである。ハイブリッドロケットエンジンは、固体燃料と液体酸化剤が別々に搭載されているため、安全性が高く、推力の制御や再点火が可能である。

しかし、ハイブリッドロケットは推力が低く、実用化された例は少ない。原因の一つとして、燃料後退速度の低さが挙げられる。これは、Figure 1のように固体燃料が燃焼するときに燃料表面近傍に境界層が形成され、この境界層内で拡散火炎が発生する境界層燃焼を起こすことが要因である。この拡散火炎面と固体燃料表面の距離が離れているため、固体燃料表面に伝わる熱流束が小さくなり、燃料の溶融、気化が遅くなる。

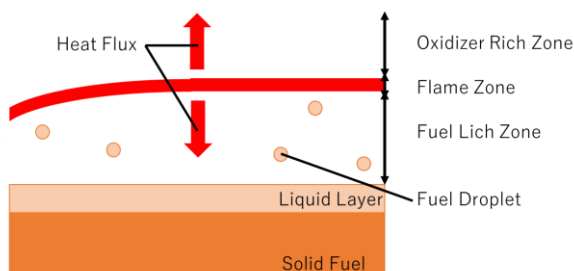


Figure 1 Model of boundary layer combustion.

改善策として、固体燃料に燃焼熱が高い物質を添加する方法が挙げられる。これにより燃焼時に高熱を発生できるため、固体燃料の溶融や気化を促進し、燃料後退速度の改善が期待できる。候補となる物質を Table 1 に示す。

Table 1 Combustion heat of various elements^[1]

Element	Combustion heat[kj/g]
Be	23.94
Li	20.04
B	18.24
Al	16.43
Mg	14.92
Ti	11.82

Table 1 より、取り扱いにくい Li、毒性がある Be を除くと、B の燃焼熱が最も高いことがわかる。しかし、B は表面に酸化被膜が形成され、燃焼を妨げる性質があるため、B と同時に着火性が良く燃焼熱も高いマグナリウム (Mg-Al) 粉末を添加することで B の燃焼完結性を上げられないかと考えた。本研究では、マイクロクリスタリンワックス (WAX) に B 粉末及び Mg-Al 粉末を添加して着火試験を行い、性能を評価する。

2. 実験

2.1. 焼結処理

先行研究^[2]より、添加する B 粉末と Mg-Al 粉末を可能な限り凝集させることで燃焼完結性が上がると考え、Ar 雰囲気下で加圧、加熱することで焼結させた粉末を作成した。

2.2. 着火試験

本研究では、Figure 2 のように、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た。電気炉内に設置した耐熱カップ内部の温度が 450°C に達した後に固体燃料を投入し、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

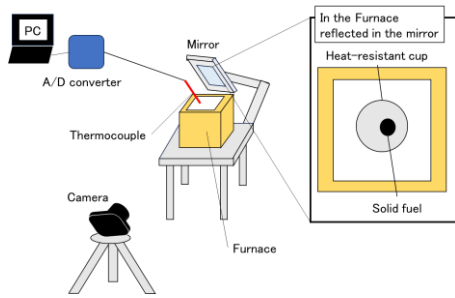


Figure 2 Ignition test equipment.

日本精蠟製のWAXと高純度化学研究所製のB粉末、関東金属製のMg-Al粉末を使用した。WAX 100%と、WAXにBとMg-Alの混合比1:1の混合物を10%と20%、BとMg-Alの焼結体を10%と20%を添加した計5種類の試料を作製した。作製した試料はFigure 3に示すように、φ6mm×6mmの円柱状に成形した。

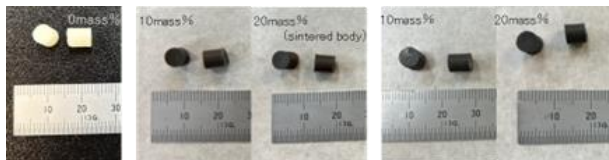


Figure 3 Solid fuel samples

3. 実験結果及び考察

着火試験により得られた火炎の様子をFigure 4に、添加量の変化と着火遅れ時間、燃焼時間との関係をFigure 5, 6に示す。着火試験はそれぞれ3回ずつ行い、平均値をグラフに示した。

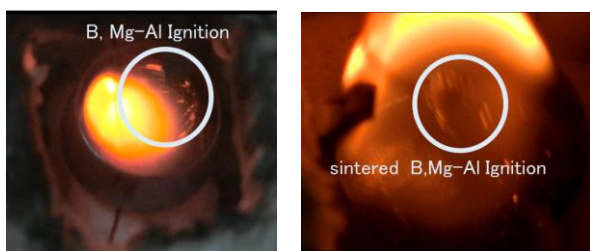


Figure 4 State of combustion flame
B+Mg-Al and Sintered powder added 10mass%

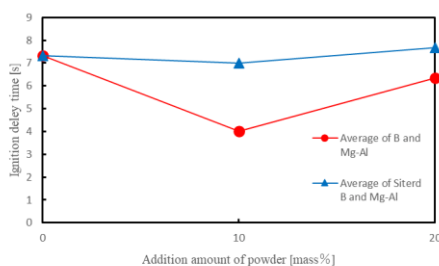


Figure 5 Results of ignition delay time.

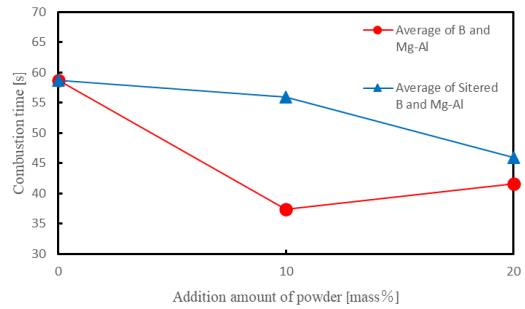


Figure 6 Results of combustion time.

Figure 4の燃焼時の火炎の様子から、火花が発生していることが確認できた。このことから、添加した金属粉末が燃焼したと考えられる。しかし、緑色の火花は確認できないため、Bへの着火は不明である。また、Figure 5より、着火遅れ時間に着目すると、未焼結体の10 mass%の添加では熱伝導率が増加することで減少し、添加粉末を増やしたことで20 mass%の添加では熱容量が大きくなり増加してしまったと考えられる。一方、焼結体では、WAXが先に着火し、焼結体の添加が着火遅れ時間の短縮に寄与しなかったため変化がみられなかったと考えられる。Figure 6より、燃焼時間に着目すると、未焼結体は10 mass%で減少した後一定になり、焼結体は緩やかに減少し続けた。これは、未焼結体は金属の燃焼熱で燃焼が促進されたが、金属粉末の添加量を増やしたことにより燃焼を維持するための熱量が増え、燃焼時間の減少が止まったのに対し、焼結体では未焼結のまま残っている粉末と焼結体の燃焼の相互作用で減少が続いたと考えられる。

4. 結論

- 火炎の様子より、火花が確認できたためBとMg-Al粉末が着火している可能性がある。
- BとMg-Al粉末の混合物の添加により10 mass%では着火遅れ時間および燃焼時間の減少がみられた。
- 焼結体の添加では着火遅れ時間は変化せず、燃焼時間は減少し、混合物と比べて緩やかに減少した。

5. 参考文献

[1] Yuasa, S., "Characteristics of Ignition and Combustion of Metals", Journal of the Combustion Society of Japan, Vol.45, No.133, 2003, pp.152-16

[2] 川澄祥久: ボロン粉末とアルミニウム粉末を添加したハイブリッドロケットエンジン用WAX系固体燃料の性能評価、令和4年度日本大学大学院理工学部航空宇宙工学専攻修士論文、2022。