

WAX系ハイブリッドロケットにおける 燃料後退速度に放射熱伝達が与える影響

濃沼悠斗^{*1}, 那賀川一郎^{*2}

Study on Regression Rate of Wax Fuel Hybrid Rocket by Radiation Heat Transfer

Yuto KOINUMA^{*1}, Ichiro NAKAGAWA^{*2}

ABSTRACT

Hybrid rocket propulsion has problem of low regression rate. This problem causes low thrust and low performance than liquid or solid rocket propulsion. To solve this problem, using wax fuel having a low melting point. Wax fuel is possible to obtain regression rate 3-4 times as high as HTPB and plastics fuels. However, low melting point fuel has disadvantageous low combustion efficiency by discharged without combustion, insufficient strength and having fuel supply instability. Specifically, it is considered that the solid is overheated by radiation heat transfer, which decreases the strength and causes fuel supply instability. Therefore, this paper describes the study on effect of the regression rate caused by blackening. As a result, as the addition rate is increased, regression rate showed a decrease and viscosity an increase. Furthermore, it was shown that the sensitivity of regression rate to viscosity change is higher than other fuels. It is considered that this improvement in sensitivity is due to radiation heat transfer.

Keywords: Hybrid rocket, Radiation heat transfer, Regression rate, Viscosity

概要

近年では超小型ロケットや有人サブオービタルの推進システムとしてハイブリッドロケットが用いられることがある。しかし、このハイブリッドロケットはローンチサービスとして主に用いられている液体推進系や固体推進系と比較すると実用化の例は少ない。これは、燃料後退速度が低く、大推力化が困難で、液体推進システムや固体推進システムと比較して推力密度が低いことや、燃焼効率が低いこと、燃料質量流量が酸化剤質量流量に依存することを起因とする O/F シフトなどの問題が存在するためである。これらの問題のうち、当研究室では低推力密度の改善策として、大推力化を図り、低融点なワックスを燃料として採用している。ワックス燃料は従来の HTPB や PMMA といった樹脂系燃料と比較して 3~4 倍の燃料後退速度を獲得できる。

しかし、ワックスは樹脂系燃料と比較して機械的強度は劣り、長秒時の燃焼においては燃料深部まで伝熱によって軟化し、強度低下に伴う崩落発生の可能性をもつことや、燃料供給の不安定化、未燃燃料の排出に伴う燃焼効率の悪化といった問題も生じる。そこで、ワックス燃料へカーボンブラックを添加し、燃料深部への熱伝達を防止し、燃料供給安定化を図る。本論文ではカーボンブラックの添加による燃料後退速度への影響について記す。結果として、添加率の増加に伴って燃料後退速度は低下し、熔融液層の粘度は増加を示した。さらに粘度の変化に対する燃料後退速度の感度は、先行研究の燃料と比較して高くなることが示され、放射熱伝達の影響が表れていると考察する。

1. 序論

先述のように、ワックス燃料は長秒時の運転や外力によって崩落といった不安定燃焼を発生させることが

ある。地上燃焼試験における正常燃焼時と燃料崩落時の様子を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 地上燃焼試験における燃料崩落時の様子

このような燃料の崩落は O/F に大きな変化を与え、特性排気速度や比推力といった性能の低下につながる。従来の燃料は淡黄色や白色で、燃料深部へと伝熱することで強度低下に伴う不安定供給を起こすと考えられる。ワックス等の低融点燃料の燃焼では、燃料は熔融液層を形成し、この熔融液層から固層への対流熱伝達と火炎帯からの放射熱伝達によって燃料供給が成される。ここで、燃料へ熱の供給を行う放射熱伝達は燃料表面だけでなく燃料深部まで透過することが可能である。この透過によって燃料が過熱され、強度低下及び不安定供給がされると考え、カーボンブラックによる燃料の黒色化によって透過の防止を図る。本研究ではワックス燃料へカーボンブラックを添加した際に、燃料後退速度を評価関数として放射熱伝達が燃料に及ぼす影響を評価することで、燃料の安定供給化を図る。

2. 実験概要

2.1. 理論

まず、ハイブリッドロケットにおける燃料後退速度 \dot{r} は以下の実験式によって与えられる。

$$\dot{r} = aG_{ox}^n = a \left(\frac{\dot{m}_{ox}}{A_{port}} \right)^n \quad (1)$$

ここで \dot{m}_{ox} は酸化剤質量流量、 A_{port} はポート内断面積を示す。式(1)に示される様に、燃料後退速度は酸化剤質量流量によって支配される。よって、実験時にはこの酸化剤質量流量を変化させ、得られた燃料後退速度と酸化剤質量流束を整理することによって、 a 係数と n 指数を取得することになる。このとき、酸化剤質量流量はチョークオリフィスなどによって取得することができるが、ポート径については燃焼とともに拡大し、時々刻々と断面積が変化する。実験後にはいびつな形状で計測も不可能である。そのため、燃焼前後のポート断面積より、燃焼時間中の平均のポート断面積を算出する。このとき、燃焼終了後のポート径 $D_{port,f}$ は燃焼前後の質量 ΔM 、燃料密度 ρ 、燃料長さ L 、初期ポート径 $D_{port,i}$ を用いて以下の式で与えられる。

$$D_{port,f} = \sqrt{\frac{4\Delta M}{\pi\rho L} + D_{port,i}^2} \quad (2)$$

ここに示す様に、燃焼中の平均ポート断面積を使うことから、本実験で算出している燃料後退速度はすべて燃焼時間中の平均値であることに注意されたい。

次に、上述した燃料後退速度が液層から固層への熱伝達が支配的であるとし、熱流束を用いて考察を行う。この際に、固体燃料上で熔融した液層から固体燃料への局所熱伝達率 h_x は、液層の流れが層流であると仮定した際に次式で表される。

$$h_x = 0.332k \text{Pr}^{1/3} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \quad (3)$$

ここで、 k は熱伝導率、 u_∞ は液層の流速、 ν は動粘性係数を示す。また、Prandtl数 Pr を粘度 μ と定圧比熱 C_p を用いて、

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4)$$

とし、式(1)へ代入することで以下の式を得る。

$$h_x = 0.332k^{2/3}C_p^{1/3}\mu^{-1/6}\sqrt{\frac{u_\infty\rho_l}{x}}(T_l - T_s) \quad (5)$$

ここで、 ρ_l は液層の密度を示す。さらに、固体燃料表面における熱平衡式より、熱伝達率は液層温度 T_l 、固体燃料表面温度 T_s 、固体燃料初期温度 T_0 、固体燃料の密度 ρ_s を用いて、以下の式で表すことができる。

$$h(T_l - T_s) = i\rho_s C_p (T_s - T_0) \quad (6)$$

式(6)を式(5)へ代入し、最終的に以下の式を得る。

$$h(T_l - T_s) = i\rho_s C_p (T_s - T_0) \quad (7)$$

ここで、本研究で使用する燃料はワックスが主成分であり、添加物を加えた際にも物性的に変化が少ないと考えられる熱伝導率、定圧比熱、液層密度、固体燃料密度、液層温度、固体燃料表面温度、固体燃料初期温度がどの燃料においても等しいと仮定をする。また、同一形状の燃料であるため、酸化剤質量流量と酸化剤密度が同一程度であれば連続の式より、ポート内断面積を通過する酸化剤流速はほぼ等しくなると言える。さらに、酸化剤流速と液層流速が等しいと仮定を行うことで、液層流速も各実験条件において定数として扱うことができる。これらの仮定を式(7)に適用することで、以下の関係性を得る。

$$i \propto \mu^{-1/6} \quad (8)$$

この関係を用いて、添加率を変化させた際に生じる粘度の変化に対する各燃料の燃料後退速度の変化を調べる。同時に、添加物によって熱伝達率を変化させた際に、上記関係がどのような影響を受けるかを調べる。

2.2. 燃料及び添加物

本研究で用いる燃料は日本精蠟製マイクロクリスタリンワックス Hi-Mic-2095 をベースとしている。ここに、熱伝達率の変化を起こすために、三菱カーボンブラック製汎用カラー#30を用いて黒色化を行う。これらのベースワックス及びカーボンブラックを以下の Fig. 2 に示す。

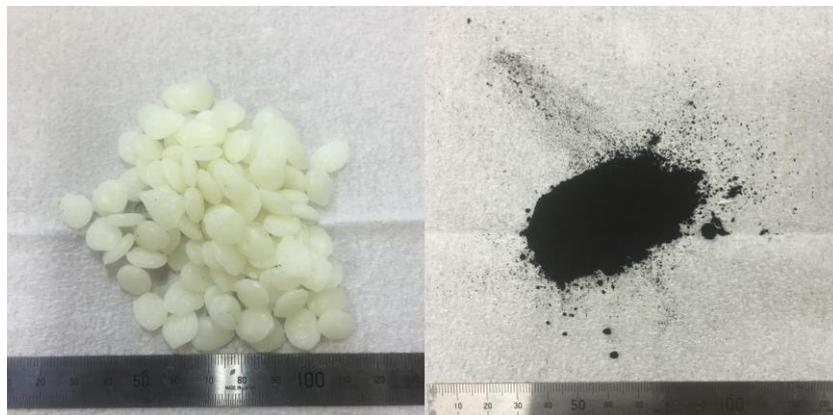


Fig. 2 Hi-Mic-2095 及びカーボンブラック外観

このカーボンブラックは粒径が 30 nm のものを使用し、粘性の変化を与えるために添加率は質量分率

で 1, 5, 10 %を添加し, 実験を行う. また, 先行研究で粘度及び燃料後退速度が取得されている燃料を比較対象として実験を行う. この比較対象の燃料は Hi-Mic-2095 に EVA (エチレン酢酸ビニル共重合体) やステアリン酸を添加した燃料の他に, 日本精蠟製パラフィンワックス FT-0070, FT-105 に EVA を添加した燃料である. それぞれ添加物は質量分率で~20 %添加されたものである.

2.3. 実験装置

本研究では式(8)の関係性を取得するため, 燃料後退速度及び粘度の取得実験を実施する.

燃料後退速度の取得実験は以下の Fig. 3 に示す実験装置を用いて行う.

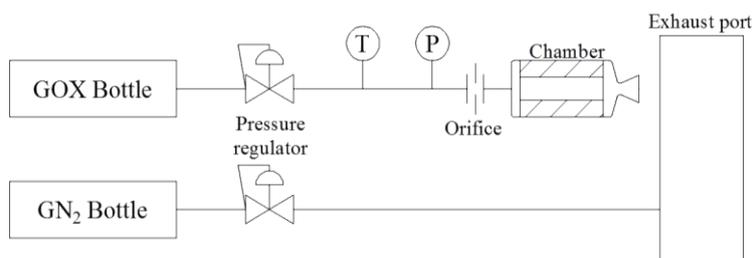


Fig. 3 燃料後退速度取得実験用装置概要図

この実験では酸化剤にガス酸素を用いる. 酸化剤質量流量はチョークオリフィスによって制御され, 燃焼時間は約 5~6 秒である. コントロールバルブはレギュレータであり, 2 次バルブを閉じることで燃焼を終了させるアナログコントロールシステムである. 実験供試体は以下の Fig. 4 に示す規格に従って製造を行う.

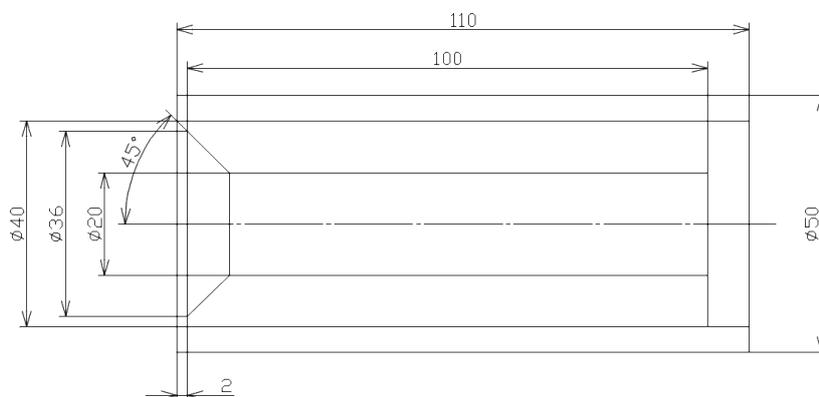


Fig. 4 実験供試体規格

次に, 粘性の取得実験は以下の Fig. 5 に示すアナログ式ビスコテスターを用いて行う.



Fig. 5 アナログ式ビスコメーターを用いた粘度計測の様子

溶融させた燃料中にローターを入れ、燃料温度が 5 °C 低下するごとに粘性値を記録する。この実験を各組成の燃料に対して複数回実施した。

3. 実験結果及び考察

3.1. 実験結果

まず、カーボンブラック添加燃料の燃料後退速度の取得を行った。それぞれの添加率における酸化剤質量流束と燃料後退速度をプロットしたグラフを Fig. 6 に示す。

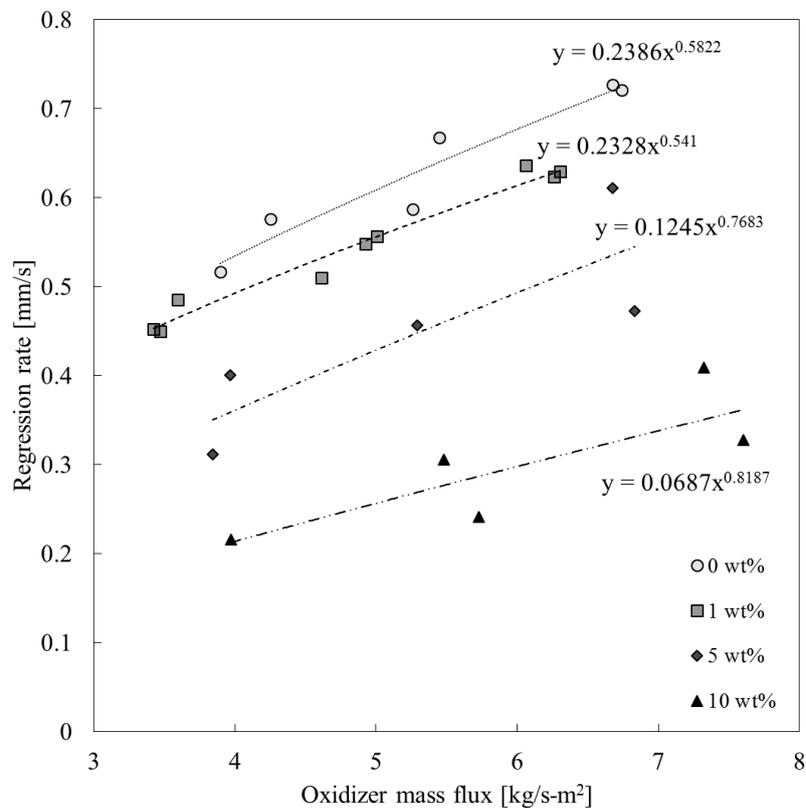


Fig. 6 燃料後退速度実験結果

Fig. 6 より，カーボンブラックの添加率の増加に伴って燃料後退速度は低下することが示される．また，グラフ中に示す数式はそれぞれの添加率における燃料後退速度の累乗近似曲線を示す．この累乗近似式より a 係数及び n 指数が決まり，それぞれの燃料の理論燃料後退速度は以下の式によって与えられることとなる．

$$0\% \quad \dot{r}_{00} = 0.2386G_{ox}^{0.5822} \quad (9)$$

$$1\% \quad \dot{r}_{01} = 0.2328G_{ox}^{0.5410} \quad (10)$$

$$5\% \quad \dot{r}_{05} = 0.1245G_{ox}^{0.7683} \quad (11)$$

$$10\% \quad \dot{r}_{10} = 0.0687G_{ox}^{0.8187} \quad (12)$$

ここで下付きの数字は添加率を示す．

次に各添加率における温度と粘度をプロットしたグラフを Fig. 7 に示す．

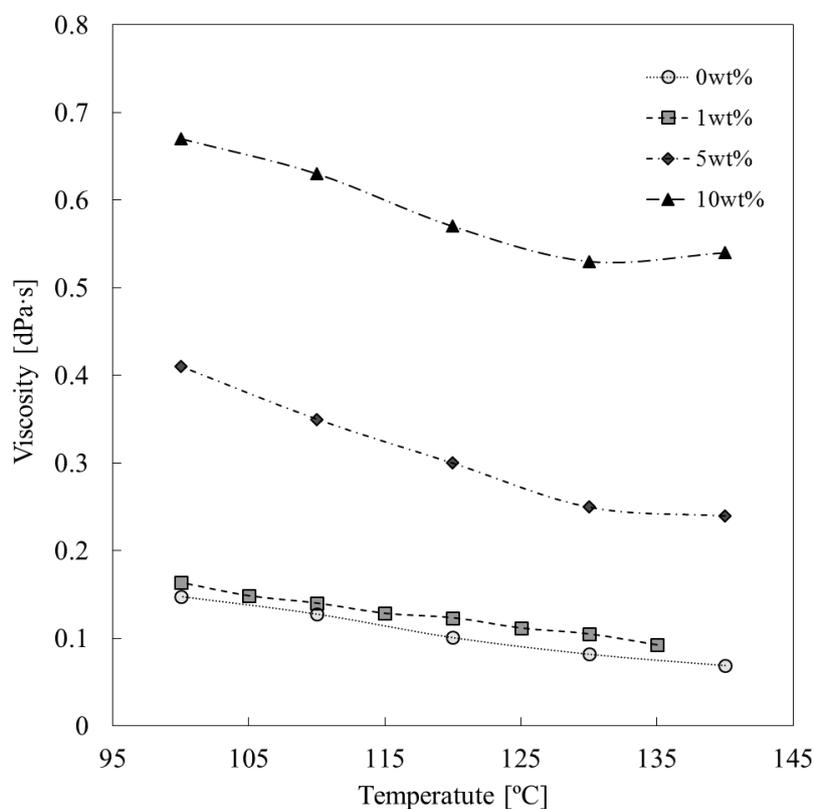


Fig. 7 粘度計測結果

Fig. 7 より，カーボンブラックの添加率の増加と共に粘度も増加を示す結果となった．

これらは先行研究で取得されたデータと同様の傾向を示している．ここで，得られたデータより式(8)の関係性を示すために，熔融液層の温度を仮定する．本研究ではどの燃料においても熔融液層は 120 °C として仮定をする．これはワックスなどの鎖式飽和炭化水素の炭素数が 200 までの場合，融点が約 400 K である結果が報告されているためである²⁾．

ここで，添加量を変化させた燃料の 120 °C での $\mu^{-1/2}$ 及び，式(9)~(12)に酸化剤質量流束 G_{ox} を 5 kg/s·m² として代入し，得られた理論燃料後退速度をプロットしたグラフを Fig. 8 に示す．また，先行研究で取得され，同様に整理を行った他の組成の燃料のデータも同時に示す．

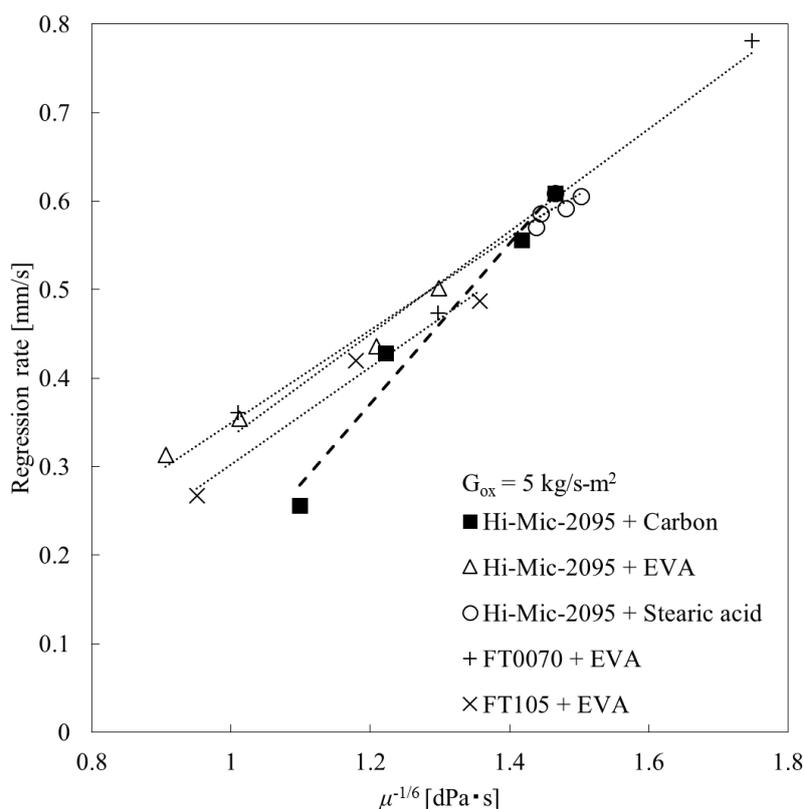


Fig. 8 各燃料における燃料後退速度の粘度感度

ここで示す各燃料は全て $\mu^{-1/6}$ に対して燃料後退速度が線形にプロットされ式(8)の関係を満たすことが示された。また、カーボンブラックを添加した燃料以外は同程度の傾きを示す。カーボンブラック添加燃料のみ $\mu^{-1/6}$ に対して感度が高いことを示す結果となった。

3.2. 考察

Fig. 8 が示す通り に対して燃料後退速度は比例関係を示し、式(8)を満たすことが確認された。しかし、カーボンブラックを添加した燃料のみその傾きが大きく、粘度の変化に対する感度が高いという結果を示した。これは黒色化によって熱伝達率の変化によって生じたものと考えられる。

しかし、実際にこれが放射熱伝達によるものであることは示すことができていない。理論においても放射熱伝達を考慮せず、従来の燃料との変化を得ることしかできていない。そのため、今後は燃料温度の直接計測を行い、従来の燃料と比較して黒色化した燃料の固層温度を取得する必要がある。これは応答性の高い素線径が 25 μm の熱電対を燃料中に設置し、実験時の温度分布の取得を予定している。

4. 結言

カーボンブラックを添加した黒色の燃料の燃料後退速度を取得し、従来の燃料との比較を行った。以下に得られた結論を示す。

- (1) カーボンブラックを添加した燃料の燃料後退速度及び粘度を取得した。
- (2) カーボンブラックを添加した燃料は従来の燃料と比較して粘度に対する燃料後退速度の感度が高いことが示された。
- (3) 粘度に対する燃料後退速度の感度変化は黒色化に伴う放射熱伝達の影響によるものと推察されるため、燃焼中の燃料温度のデータを取得する必要がある。

参考文献

- 1) 久保田浪之介, ロケット燃焼工学, 日刊工業新聞社, 1995.
- 2) M.A.Karabeyoglu, B.J.Cantwell and J.Stevens, "EVALUTION OF HOMOLOGOUS SERIES OF NORMAL - ALKANES AS HYBRID ROCKET FUELS," 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005.
- 3) I. Nakagawa, S. Hikone , T. Suzuki, "A Study on the Regression Rate of Paraffin-based Hybrid Rocket Fuels," AIAA 2009-4935, 2009.

*1 東海大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 (Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tokai University.)

*2 東海大学 工学部 航空宇宙学科 教授 (Professor, Dept. of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, Tokai University.)