

分散剤を含む黒色化ワックス燃料の燃料後退速度特性

齋藤 楓士^{*1}, 福崎 雅也^{*2}, アルハテミ ファハド^{*2}, 森田 貴和^{*2}

^{*1} 東海大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

^{*2} 東海大学 工学部 航空宇宙学科

Regression Rate Characteristics of Blackened Wax Fuels with Dispersant

Fushi SAITO^{*1}, Masaya FUKUZAKI^{*2}, Fahad Al Haatemi^{*2}, Takakazu MORITA^{*2}

^{*1} Course of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokai University

^{*2} Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, Tokai University

ABSTRACT

Small amount of carbon black is often added to wax fuels in order to prevent melting inside the wax fuel grains. Since carbon black cannot uniformly disperse in a wax fuel, we use a dispersant for carbon black to be in dispersed uniform. However, the effect of dispersants on the fuel regression rate has not been investigated well. Therefore, we obtained the regression rate characteristics of carbon black containing wax fuels with dispersant added.

Keywords: Hybrid Rocket, Combustion, Wax Fuel, Fuel Regression Rate, Dispersant

概要

ワックス燃料グレインの崩落を防ぐためにカーボンブラックの添加がしばしば行われる。ただ、カーボンブラック単体では一様に分散させるのが難しいので、分散剤などを用いて均一化が図られる。しかしながら、この分散剤の添加が燃料後退速度に及ぼす効果についてはまだよく調べられていない。そのため、本研究では分散剤を加えたカーボンブラック含有ワックス燃料の燃料後退速度特性を求め、その特性について考察した。

1. はじめに

著者らはこれまでに固体燃料に放射加熱を加えて燃料後退速度を可変させる方法について研究を行ってきた¹⁻³⁾。ハイブリッドロケットを着陸機のエンジンに用いた場合、バルブ操作では高速で細かな推力変化を得ることが難しいため、外部から放射熱を加えることでそれを実現しようとするのが目的である。その基礎研究を実施する際には、放射熱を吸収しやすくするため、燃料に黒色化を施した。また、ワックス燃料では黒色化することにより燃料の崩落を防ぐことができるため、ハイブリッドロケットで使用する際には必要不可欠である。黒色化をするためにカーボンブラック(以降CBと略記)がしばしば用いられるが、その燃料後退速度特性を調べた研究には多くの先行研究がある⁴⁻⁶⁾。それらの研究によると、まずカーボンブラックの質量分率の増加に伴って、固相表面上に形成される液層の粘度が増加し、それによる燃料後退速度の低下が実験的に確認された^{4,5)}。さらに、カーボンブラックの黒色化によって、表面近傍の固相の温度低下、一方で熔融液層の温度上昇が極細熱電対によって確認された⁶⁾。また、燃料製造時の問題としては、カーボンブラックを添加すると、ワックスが固化する際に同粒子が沈殿することが分かった⁵⁾。特に最後の問題点は、固体燃料の不均一による燃料後退速度の変化、ひいてはO/Fの時間的変化を引き起こす可能性があり、その影響について調べる必要がある。

2. 実験装置・方法

2.1. 固体燃料

固体燃料の主成分は合成ワックスで、日本精蠟株式会社のフィッシャー・トロプシュ (Fischer-Tropsch) ワックスの FT0070 を使用した。放射伝熱を固相表面で吸収するため、カーボンブラックを添加することがしばしば行われるが、本研究では三菱ケミカル(株) の三菱®カーボンブラック #30 を使用した。平均径は 30 nm, 真密度はおよそ 1.8 g/cm³ である。また、カーボンブラックをワックス中に一様にするために、分散剤として日油株式会社のエスリム AD-508E を使用した。なお、ワックス燃料へのカーボンブラックおよび分散剤の添加量については、 X をワックス燃料 (FT0070) の質量、 Y をカーボンブラックの質量、 Z を分散剤の質量とすると、カーボンブラックの質量分率 Y_{CB} と分散剤の質量分率 Y_D は以下のように計算される。

$$Y_{CB} = \frac{Y}{X + Y + Z} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

$$Y_D = \frac{Z}{X + Y + Z} \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

分散剤の添加量については、燃料全量に対して 2wt% になるように調整した。具体的には、FT0070 が 9.3g で、カーボンブラックを 0.05g (≒0.5wt%) としたとき、分散剤は 0.19g (≒2wt%) となるようにした。実験全体での添加量の一覧を付録の表 A1 に示す。下記の図 1 において、左がカーボンブラック無しの燃料であり、右がカーボンブラックを添加した燃料である。燃料寸法は、代表的に L30×W30×H13 である。また、上流から流れてくる酸化剤流がワックス燃料上面で大きく剥離することが無いように、燃料には上流側に向かって C3 で面取りがなされている。この面取りが無いと、燃料の上流側が大きく抉られたり、隙間から燃料背面に液化したワックスが流れ込む恐れがある。また、燃料密度は 926.6 kg/m³ で、融点は 71°C である。燃焼時に溶融した燃料が固体燃料の側面や裏面に付着しないようにポリイミド製のテープを貼り付けた。

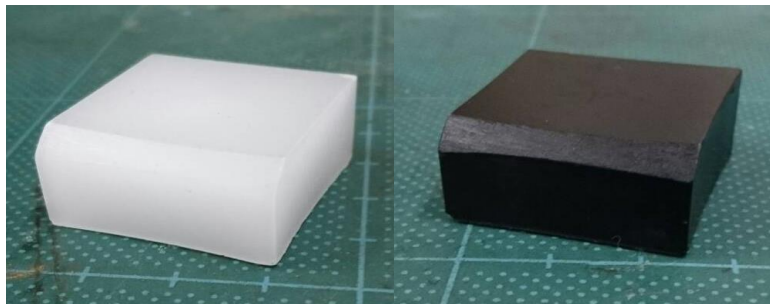


図 1 ワックス燃料 (左 : FT0070 単体, 右 : FT0070+CB)

2.2. 燃焼器

図 2 に示す 2 次元燃焼器を用いた。流路断面は 30×30 mm の矩形断面で、燃焼器の上流側には酸化剤流を一様な流れにするための長さ 300 mm の整流ダクトが設けられている。燃焼器の上部には 80×30 mm の観測区間を持つ石英ガラス窓がある。また、燃焼器はノズルの方向に向けて 3° の負の傾斜が付いている。このとき、傾斜面に平行な重力加速度の成分により、燃料表面上の溶融ワックスがスムーズに流れる効果を持つ。この傾斜角の大きさは燃料後退速度に影響を及ぼすが、今回の研究ではこれを一定としてその影響については考慮しないものとした。インジェクターのオリ

フィス径は 2.286 mm で、平均インジェクター上流圧は 0.37 MPa である。また平均燃焼時間は 4.48 sec の条件で実験を行った。ノズル径は 10mm で、燃焼圧はほぼ大気圧に近い状態である。

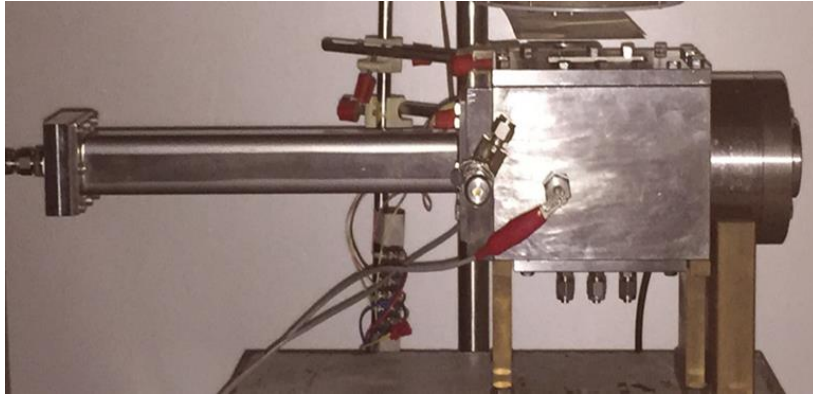


図 2 2次元燃焼器

3. 実験結果

3.1 燃料後退速度

燃料後退速度は、次式によって評価される。

$$\dot{r} = \frac{\Delta h}{t_b} \quad (3)$$

ここで、 t_b は燃焼時間である。さらに

$$\Delta h = \frac{\Delta M_{F,b}}{\rho_F \bar{L} \bar{W}} \quad (4)$$

の関係があり、 $\Delta M_{F,b}$ は燃料消費量、 ρ_F は固体燃料の密度、 \bar{L} 、 \bar{W} はスラブ状燃料の長さおよび幅の平均値をそれぞれ表している。また、平均酸化剤質量流束を以下の式で求めると、精度の高い結果が得られることが分かっている。

$$\bar{G}_{OX} = \frac{\bar{M}_{OX}}{\bar{A}_p} \quad (5)$$

平均ポート断面積 \bar{A}_p は、矩形断面ポートの場合、次式で評価される。

$$\bar{A}_p = w \left(h + \frac{\Delta h}{2} \right) \quad (6)$$

ここで、 w は矩形断面ポートの幅、 h はその高さを表している。平均酸化剤質量流量は

$$\bar{M}_{OX} = \frac{1}{t_b} \int_0^{t_b} \dot{M}_{OX} dt \quad (7)$$

と表される。

3.2. 無次元液層厚さ δ^* の導出

液化したワックスは、固相表面上に液層を形成する。この液層は火炎からの熱伝達を受けて気液境界面よりガス化するが、一部は下流に向かって固相表面に沿って流下する。可視化の様子から、液層の厚さは、流下する方向にほぼ一定になっているように見える。このことから本研究では、固相表面から液化するワックスの量と気化する量が釣り合っていて、液化ワックスが表面に沿って流れる1次元流として見なせると仮定する。また、燃料下端から流出した液体ワックスが燃焼せず、全て残渣になると仮定する。ただし、実際に後部でも多少燃焼があるため、その分誤差になる。液

層中のワックスを非圧縮性とみなし、圧力勾配を無視すると、流れの運動方程式は次式となる。

$$\mu_L \frac{d^2 u_L}{dy^2} = 0 \quad (8)$$

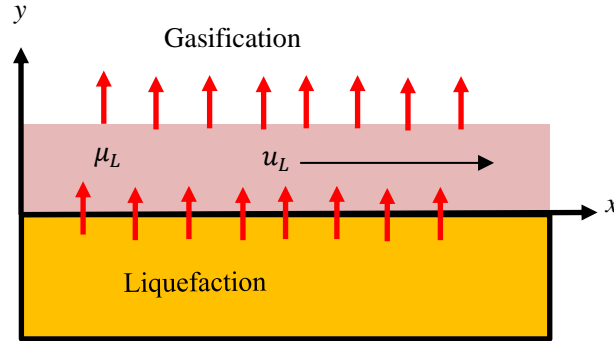


図3 固相表面上に形成される液体ワックス層

固相表面($y = 0$)では、 $u_L = 0$ 、液相と気相の界面($y = \delta_L$)では次の関係が成り立つ。

$$\mu_L \frac{du_L}{dy} = \frac{1}{2} \rho U_m^2 c_f \quad (9)$$

式(8)を積分して上記の境界条件を当てはめると、

$$u_L = \frac{1}{2\mu_L} \rho U_m^2 c_f y \quad (10)$$

上式を液層の厚さで積分し、全燃焼時間 t_a に流れた熔融ワックスの量 $\Delta M_{F,r}$ を計算すると、

$$\Delta M_{F,r} = t_a w \rho_L \int_0^{\delta_L} u_L dy = \frac{1}{4\mu_L} \rho U_m^2 c_f t_a w \rho_L \delta_L^2 \quad (11)$$

となる。全燃焼時間はこれ以外にも特性排気速度を求める際にも使用される。上式より、液層の厚さ δ_L は以下のように求められる。

$$\delta_L = \sqrt{\frac{2\mu_L \Delta M_{F,r}}{t_a w \rho_L \left(\frac{1}{2} \rho U_m^2 c_f\right)}} = \sqrt{\frac{2\mu_L p \Delta M_{F,r}}{t_a w \rho_L R T G^2 \left(\frac{c_f}{2}\right)}} \quad (12)$$

δ_L を求める際に燃料の下流で燃焼しない等の仮定を設けているため、 δ_L は液層の厚さを正確に表しておらず、あくまでも厚さの大小を比較する指標である。したがって、ここでは δ_L を燃料長さで無次元化した δ^* で液層の厚さを比較する。

$$\delta^* = \frac{\delta_L}{L} \quad (13)$$

吹き出し係数の定義より、 $c_f/2$ が計算できる。

$$\frac{c_f}{2} = \frac{\rho_F \dot{r}}{B_a G} \quad (14)$$

また、吹き出し係数は以下のように書き表すことができる。

$$B_a = \left(\frac{\rho_F \dot{r}}{q G c_{f0}/2} \right)^{\frac{1}{1-k}} \quad (15)$$

ここで、 $c_{f0}/2$ は以下の湧き出しの無い平板上の流れに対するブラジウスの式で与えられる。

$$\frac{c_{f0}}{2} = 0.03 \left(\frac{Gx}{\mu} \right)^{-0.2} \quad (16)$$

RT の計算に関しては以下の式を使う。

$$RT = \eta_{c^*}^2 (RT)_{th} = \eta_{c^*}^2 \frac{R_u}{W_m} T_{af} \quad (17)$$

断熱火炎温度 T_{af} 、燃焼ガスの平均分子量 W_m と粘性係数 μ と比熱比 γ 、理論特性排気速度 c_{th}^* は、NASA-CEAによる化学平衡計算によって求めた。本実験では、カーボンブラック入りのFT0070の粘度のデータがないため、カーボンブラックなしのFT0070の代表値 $\mu_L = 4.0[\text{mPas}]$ を用いた。また、亜音速ノズルで燃焼圧が低いため、特性排気速度の誤差が比較的大きい。ここでは、液層の厚さの大小関係を明確にすることが主目的であるため、 C^* 効率は代表的な値 ($\eta_{c^*} = 0.7$) を用いることにした。表面摩擦係数 c_f を求める際には、 $x = L/2$ とした。また、Altmanらによって得られた q と k の値を使っており、それぞれ1.0と0.68である。

3.3. 圧力履歴

代表的な燃焼圧の時間履歴について図 4 に、インジェクター上流圧について図 5 に示す。使用した燃料は分散剤 2.0wt%、カーボンブラック 1.0wt%添加したものである。

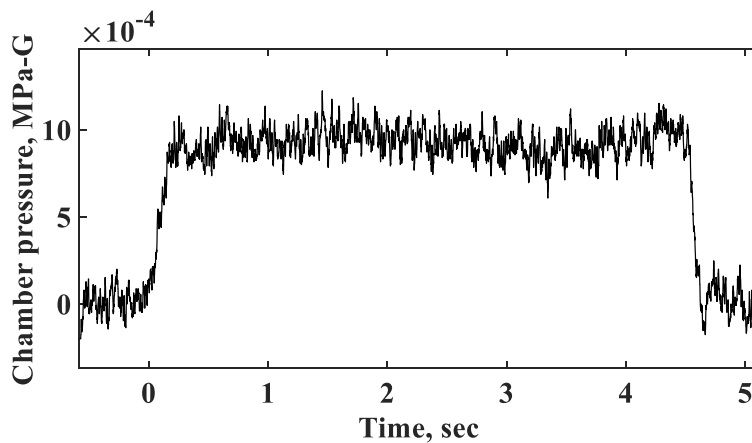


図 4 燃焼圧

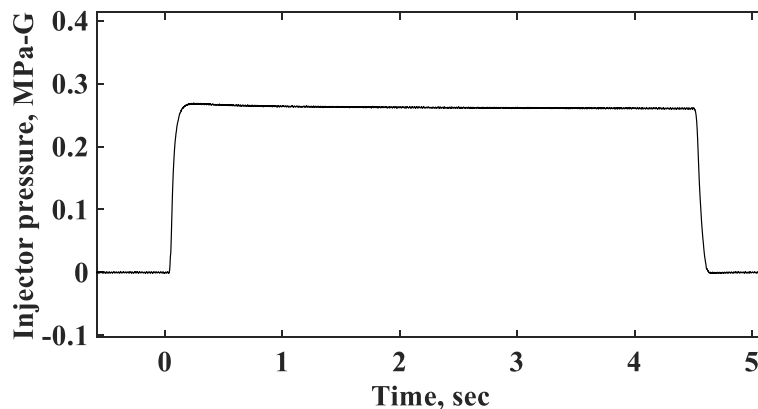


図 5 インジェクター上流圧

図 4, 図 5 において, 燃焼圧の平均値は 0.1019 MPa, 燃焼時間は 4.51 sec, 全燃焼時間は 4.64 sec, 燃料後退速度は 0.234 mm/s, 酸燃比 86.42, 酸化剤質量流束 4.064 kg/sm², インジェクター上流圧の平均値 0.359 MPa である. 燃焼圧は, 移動平均法にてノイズを除去した.

3.4. 燃料への分散剤の質量分率を変化させた時の燃料後退速度特性

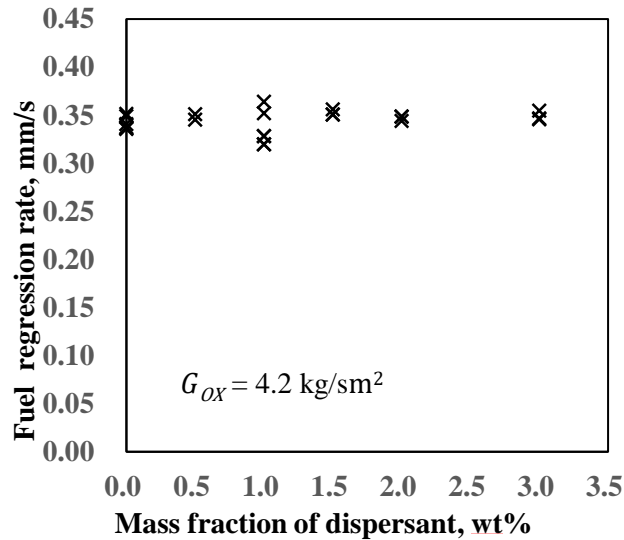


図6 ワックス燃料の燃料後退速度に及ぼす分散剤の効果

カーボンブラックを加えないで分散剤のみとした場合の燃料後退速度は, ほぼ一定で, 分散剤単体が燃料後退速度に及ぼす影響はほとんど無視できることが分かった. ただし, 分散剤が 1 wt% の時にデータがばらつく傾向が見られた.

3.5. 分散剤 2.0wt%において, カーボンブラックの質量分率を変化させた時の燃料後退速度特性

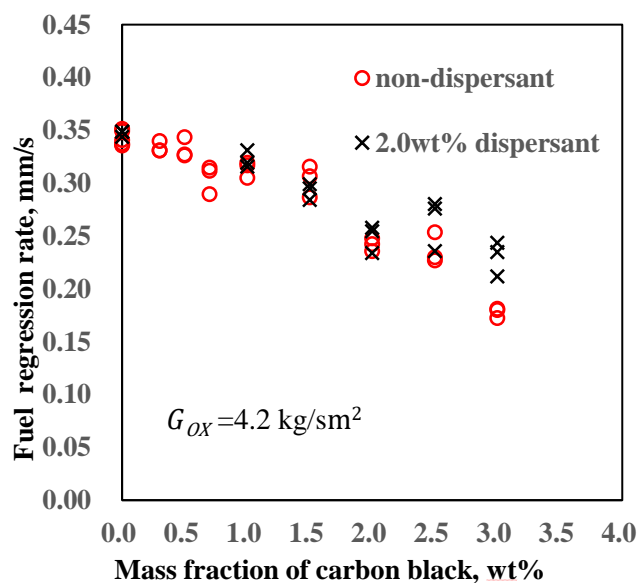


図7 ワックス燃料の燃料後退速度に及ぼすカーボンブラックの効果

先行研究と同様に、カーボンブラックの質量分率が増えるにしたがって燃料後退速度が低下する。また、分散剤を入れるとカーボンブラックの質量分率が大きくなるにつれて、分散剤を入れないケースと比べて燃料後退速度が増加した。この原因について考察するために、液層の厚さの大小を示すパラメータである無次元液層厚さ δ^* について計算を行った。

3.6. 無次元液層厚さ δ^* の計算

分散剤2.0wt%を加えてカーボンブラックの質量分率(1.0wt%~3.0wt%)を変化させた場合と、分散剤不添加でカーボンブラックの質量分率(1.0wt%~3.0wt%)を変化させた場合の無次元液層厚さを求めた。ここで、液体ワックスの密度は 778.1kg/m^3 とした。

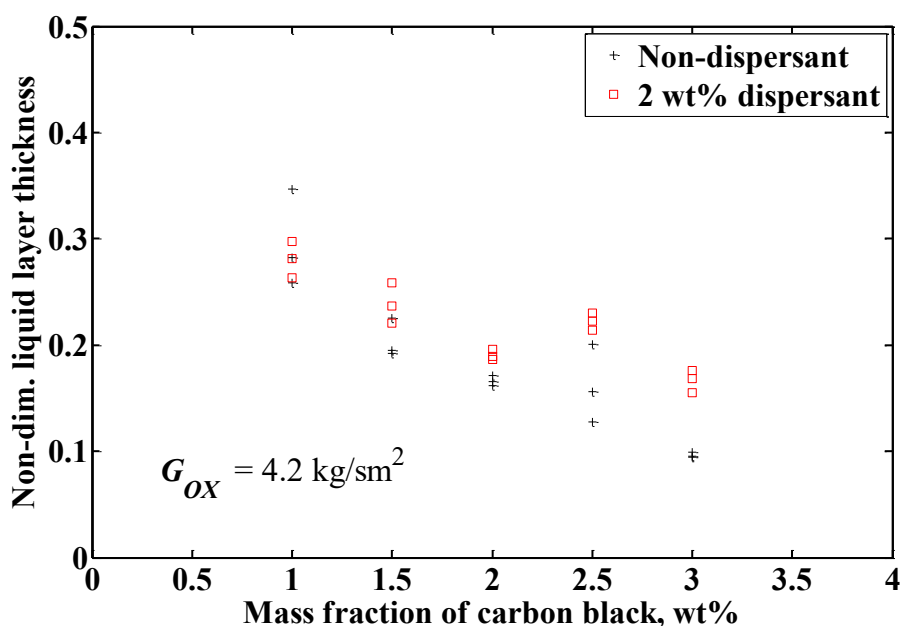


図8 カーボンブラックの質量分率に対する無次元液層厚さ

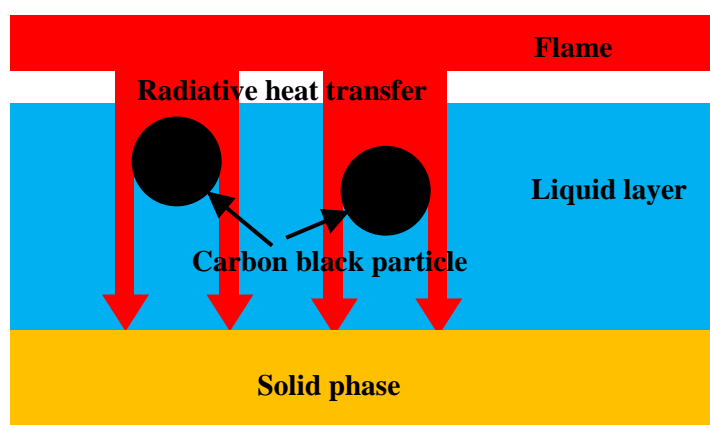


図9 カーボンブラック粒子による火炎からの輻射熱の遮断

上記の結果より、液層の厚さは分散剤を入れた方が大きくなることがわかった。液層が厚いということは、火炎からの輻射熱がより多く固相表面に到達していることを示し、このことから液層中のカーボンブラック粒子の数密度が小さいことが推察される。

図9は燃焼中の液層の様子を模式図で示したものである。この図のように液層中のカーボンブラック粒子により、火炎からの輻射が遮られ、固相表面への伝熱量が減少していると考えられる。ただし、カーボンブラックの熱伝導率が高いため、粒子自体に吸収された輻射熱の一部が再び熱伝導で固相表面に向かう可能性がある。この効果については今回の研究では考慮を除いた。分散剤を添加しなかったケースにおいて液層が薄かったということは、分散剤入りのケースに比べてカーボンブラック粒子数が多かったということを示している。基本的に分散剤はカーボンブラック粒子をワックス燃料内に一様に分散させる働きを持つので、これと比べて多かったという事実は、その分、図10の右図のように一様に分散できていなかったということになる。

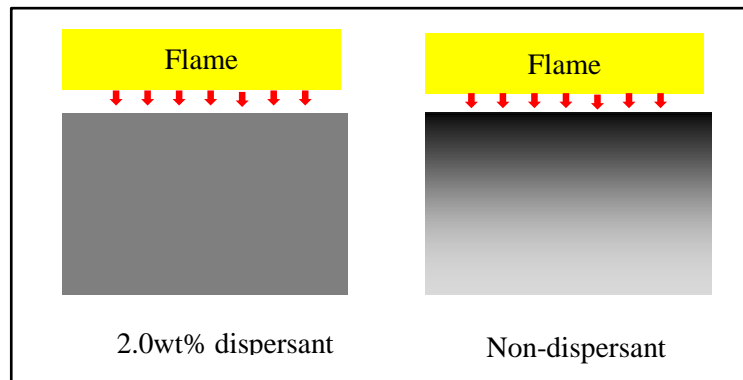


図10 カーボンブラックの分散の違い（模式図）

実際、燃料を成型する際に溶かしたワックスが固まる過程でカーボンブラック粒子が重力の作用によって容器の底面に向かい濃度が高くなる分布傾向を持つ。燃焼実験の際は、成型した時と反対に底面側を燃焼面側にして用いたので、図10のように燃料表面と燃料底面の濃度の違いが生じていると思われる。これにより、分散剤を添加しない場合、燃料後退速度の時間的変化が大きくなり、*O/F*シフトが大きくなる可能性が考えられる。

4. 結論

合成ワックス燃料に分散剤を加えたときの燃料後退速度を測定し、以下の結論を得た。

- (1)分散剤の有無に対し、カーボンブラックの質量分率は大きくなるにつれて燃料後退速度の差が増大した。
- (2)カーボンブラックを均一に分散させる効果により、分散剤入りの燃料の方が燃料後退速度の変化の幅が小さくなることが推察された。
- (3)無次元液層厚さを計算で求めた結果、分散剤入りの燃料の方が液層の厚さが大きい結果を得た。
- (4)カーボンブラックを添加する場合、分散剤を入れることにより、*O/F*シフトの抑制にもつながる。

記号表

B_a :	吹き出し係数
c_f :	表面摩擦係数
c_{f0} :	表面からの吹き出しが無い場合の c_f
G :	燃料ポートを流れるガスの質量流束
k :	blowing exponent, $k = 0.68$
L :	燃料の長さ

p :	燃焼圧
q :	$q = 1.0$
R_u :	普遍気体定数
\dot{r} :	燃料後退速度
T_{af} :	断熱火炎温度
t_a :	全燃焼時間
t_b :	燃焼時間
U_m :	ポート断面の平均流速
u_L :	固相表面に沿う方向の液層の流速
x :	固体燃料の前端を原点とし，下流方向の向きを正とした時の距離
W_m :	燃焼ガスの平均分子量
w :	矩形ポート断面の幅
$\Delta M_{F,r}$:	燃焼残差
δ_L :	燃料の液層厚さ
δ^* :	無次元液層厚さ， $\delta^* = \delta_L/L$
η_{c^*} :	c^* 効率
μ :	燃焼ガスの粘性係数
μ_L :	液体ワックスの粘性係数
ρ :	燃焼ガスの密度
ρ_F :	固体燃料の密度
ρ_L :	液体ワックスの密度

謝辞

本実験で使用したカーボンブラックは三菱®カーボンブラック #30 で，三菱ケミカル(株)から提供して頂いた．分散剤はエスリーム（AD-508E）を日油株式会社から提供して頂いた．併せてここに感謝の意を表します．

参考文献

- (1) 臼井雄太郎，勝又玲子，森田貴和，ワックス燃料における放射熱の影響に関する実験的研究，平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2013-047，2014.
- (2) Y. Deguchi, K. Aono, Y. Kurosawa, T. Watanabe, T. Morita, Y. Usui, and S. Yamaguchi, Effects of Radiative Heat Transfer on Fuel Regression Rate of Hybrid Rockets, Proceedings of Twelfth International Conference on Fluid Dynamics, OS8-13, 2015.
- (3) 青野航司，齋藤楓士，堀野玲於，阿部宗生，森田貴和，山口滋，外部放射加熱下におけるハイブリッドロケットの固体燃料の燃焼特性，第 1 回ハイブリッドロケットシンポジウム講演集，SA6000126018, 2018.
- (4) 濃沼悠斗，那賀川一郎，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，第一回ハイブリッドロケットシンポジウム，HR-2018-024, 2018.
- (5) M. Kobald et al., Viscosity and Regression Rate of Liquefying Hybrid Rocket Fuels, Journal of propulsion and power, Vol.33, No.5, 2017, pp.1245-1251.
- (6) 濃沼悠斗，那賀川一郎，ハイブリッドロケット用ワックス燃料の黒色化による効果，平成 30 年度宇宙輸送シンポジウム，STCP-2018-039, 2019.

付録

平均酸化剤質量流束, カーボンブラックや分散剤の質量分率, 燃焼時間, 全燃焼時間, 平均燃焼圧, 燃料後退速度の一覧について以下に記す.

表 1 燃焼実験の設定条件, および取得された諸量

No.	$G_{OX}, \text{kg/sm}^2$	Y_{CB}	Y_D	t_a, sec	t_b, sec	p, MPa	$\dot{r}, \text{mm/s}$
1	4.2522	1.0	2.0	4.576	4.473	0.1015	0.316
2	4.1823	1.0	2.0	4.613	4.486	0.1017	0.319
3	4.2073	1.0	2.0	4.592	4.471	0.1014	0.331
4	4.1564	1.5	2.0	4.615	4.458	0.1012	0.299
5	4.1606	1.5	2.0	4.612	4.528	0.1011	0.295
6	4.2128	1.5	2.0	4.605	4.490	0.1019	0.284
7	4.0667	2.0	2.0	4.639	4.514	0.1019	0.234
8	4.1703	2.0	2.0	4.593	4.488	0.1021	0.258
9	4.0412	2.0	2.0	4.572	4.459	0.1019	0.254
10	4.1600	2.5	2.0	4.589	4.480	0.1012	0.236
11	4.1544	2.5	2.0	4.615	4.488	0.1013	0.280
12	4.1120	2.5	2.0	4.606	4.509	0.1011	0.276
13	4.1229	3.0	2.0	4.602	4.497	0.1022	0.235
14	4.2636	3.0	2.0	4.587	4.474	0.1021	0.243
15	4.0613	3.0	2.0	4.597	4.468	0.1020	0.212
16	4.2815	1.0	0	4.642	4.483	0.1021	0.319
17	3.9413	1.0	0	4.652	4.550	0.1019	0.317
18	4.3384	1.0	0	4.592	4.501	0.1018	0.305
19	4.1180	1.5	0	4.568	4.459	0.1014	0.316
20	4.1422	1.5	0	4.615	4.470	0.1014	0.306
21	4.1683	1.5	0	4.586	4.471	0.1015	0.287
22	4.2689	2.0	0	4.564	4.502	0.1019	0.236
23	4.2456	2.0	0	4.547	4.450	0.1018	0.242
24	4.2332	2.0	0	4.571	4.456	0.1019	0.248
25	4.0985	2.5	0	4.550	4.441	0.1015	0.253
26	4.2272	2.5	0	4.626	4.511	0.1015	0.230
27	4.1622	2.5	0	4.558	4.455	0.1014	0.227
28	4.4259	3.0	0	4.582	4.469	0.1014	0.180
29	4.1542	3.0	0	4.596	4.447	0.1027	0.172
30	4.3280	3.0	0	4.552	4.467	0.1028	0.181
31	4.2968	0.3	0	4.495	4.586	0.1017	0.340
32	4.2387	0.3	0	4.495	4.586	0.1011	0.331
33	4.2818	0.3	0	4.493	4.584	0.1016	0.331
34	4.3322	0.5	0	4.485	4.612	0.1027	0.326
35	4.3796	0.5	0	4.449	4.594	0.1020	0.343
36	4.2031	0.5	0	4.486	4.577	0.1017	0.327
37	4.1646	0.7	0	4.440	4.561	0.1025	0.290
38	4.1671	0.7	0	4.441	4.534	0.0954	0.312
39	4.0973	0.7	0	4.484	4.617	0.1025	0.315
40	4.3767	0	0	4.475	4.559	0.1018	0.349
41	4.1709	0	0	4.472	4.569	0.1015	0.341
42	4.2896	0	0	4.509	4.618	0.1016	0.351
43	4.2566	0	0	4.503	4.576	0.1027	0.336
44	4.2463	0	0	4.472	4.608	0.1028	0.337

45	4.1749	0	0	4.492	4.594	0.1036	0.336
46	4.0866	0	0.5	4.435	4.577	0.1015	0.345
47	4.1621	0	0.5	4.492	4.600	0.1016	0.351
48	4.1130	0	1.0	4.472	4.648	0.1019	0.320
49	3.9640	0	1.0	4.476	4.635	0.1019	0.328
50	4.2067	0	1.0	4.481	4.606	0.1020	0.328
51	4.1130	0	1.0	4.472	4.648	0.1019	0.320
52	4.1908	0	1.0	4.497	4.563	0.1015	0.364
53	4.2758	0	0	4.471	4.629	0.1021	0.352
54	4.1934	0	1.5	4.457	4.559	0.1015	0.351
55	4.1498	0	1.5	4.469	4.583	0.1015	0.351
56	4.1309	0	1.5	4.505	4.607	0.1015	0.356
57	4.2034	0	2.0	4.460	4.562	0.1025	0.348
58	4.1085	0	2.0	4.422	4.557	0.1025	0.349
59	4.1231	0	2.0	4.515	4.640	0.1025	0.344
60	4.1803	0	3.0	4.446	4.616	0.1025	0.346
61	4.0333	0	3.0	4.493	4.617	0.1025	0.355
62	4.2649	0	3.0	4.464	4.605	0.1026	0.347

残渣, 粘性係数, 粘性係数, 断熱火炎温度, 燃烧ガスの平均分子量と比熱比, 無次元液層厚さなどの量を以下に示す.

表 2 液層の厚さ, およびその計算に必要な諸量

No.	$\Delta M_{Fr}, g$	Y_{CB}	Y_D	$\mu, mPa s$	T_{af}, K	$W_m, g/mol$	δ, mm	δ^*
1	0.93	1.0	2.0	0.042475	811.18	31.940	8.437	0.281
2	0.90	1.0	2.0	0.046062	915.88	31.927	7.893	0.263
3	0.96	1.0	2.0	0.043471	839.70	31.936	8.931	0.298
4	0.82	1.5	2.0	0.045991	913.76	31.930	7.103	0.237
5	0.86	1.5	2.0	0.042658	816.39	31.941	7.754	0.258
6	0.79	1.5	2.0	0.045047	885.70	31.933	6.621	0.221
7	0.65	2.0	2.0	0.041980	797.17	31.946	5.585	0.186
8	0.69	2.0	2.0	0.045161	889.07	31.935	5.686	0.190
9	0.68	2.0	2.0	0.045106	887.45	31.935	5.881	0.196
10	0.70	2.5	2.0	0.037115	664.98	31.962	6.409	0.214
11	0.79	2.5	2.0	0.043462	839.44	31.943	6.916	0.231
12	0.77	2.5	2.0	0.044596	872.43	31.939	6.661	0.222
13	0.62	3.0	2.0	0.044444	867.98	31.942	5.063	0.169
14	0.66	3.0	2.0	0.043146	830.36	31.946	5.273	0.176
15	0.56	3.0	2.0	0.042314	806.61	31.949	4.663	0.155
16	0.93	1.0	0	0.042105	800.71	31.941	8.465	0.282
17	0.98	1.0	0	0.040441	754.27	31.947	10.389	0.346
18	0.88	1.0	0	0.041881	794.39	31.942	7.744	0.258
19	0.73	1.5	0	0.056229	1240.68	31.887	5.855	0.195
20	0.80	1.5	0	0.049004	1005.75	31.918	6.766	0.226
21	0.72	1.5	0	0.050504	1052.94	31.912	5.761	0.192
22	0.62	2.0	0	0.043931	853.06	31.939	4.856	0.162
23	0.63	2.0	0	0.044988	884.00	31.935	4.957	0.165
24	0.64	2.0	0	0.044945	882.72	31.936	5.148	0.172
25	0.68	2.5	0	0.042910	823.58	31.945	6.028	0.201
26	0.60	2.5	0	0.043976	854.34	31.941	4.684	0.156

27	0.51	2.5	0	0.049994	1036.79	31.920	3.841	0.128
28	0.42	3.0	0	0.043314	835.22	31.945	2.844	0.095
29	0.39	3.0	0	0.044234	861.93	31.942	2.868	0.096
30	0.42	3.0	0	0.043629	844.35	31.944	2.983	0.099

式(1)と(2)に基づいて燃料の混合比を決めているが、質量計測時の精度により多少ばらついており、カーボンブラックの設定値に対して実際の質量分率は以下のようにになっている。

表 3 燃料とカーボンブラックと分散剤の混合比の詳細

CB 設定値, wt%	燃料, g	分散剤, g	CB, g	燃料, wt%	分散剤, wt%	CB, wt%
0.5	9.3	0.19	0.05	97.48	1.99	0.52
1.0	9.3	0.19	0.10	96.98	1.98	1.04
1.5	9.3	0.19	0.14	96.57	1.97	1.45
2.0	9.3	0.19	0.19	96.07	1.96	1.96
2.5	9.3	0.19	0.24	95.58	1.95	2.47
3.0	9.3	0.20	0.29	98.00	2.04	2.96