

低融点燃料を用いたハイブリッドロケットの スケール効果に関する研究

安永 尚生^{*1}, 川端 洋^{*2}

^{*1} 福岡大学

A Study on the Scale Effect of Hybrid Rocket with Low Melting Point Fuel

Naoki YASUNAGA^{*1}, Yo KAWABATA^{*1}

^{*1} Fukuoka University

ABSTRACT

The scale effect on the fuel regression rate, such as polyethylene used as a fuel for hybrid rockets, have been clarified. The effect of scale effects on low-melting-point fuels has not yet been clarified. Therefore, in this study, low-melting-point fuels were theoretically verified using the methods of previous studies and compared with conventional fuels. In addition, the fuel regression rate of low-melting-point fuels was experimentally measured. As a result, it was considered that it is the operating parameters such as G·D that affect the scale effects in the theoretical verification. Experimental verification resulted in higher fuel regression rates compared to the reference, because the end face of the fuel was burning and there could make a hole in the fuel.

Keywords: Hybrid Rocket, Fuel Regression Rate, Scale effect, Low melting point fuel

概要

ハイブリッドロケットの燃料として使用されてきたポリエチレンなどの燃料後退速度にスケール効果が及ぼす影響は明らかにされているが、低融点燃料についてはまだ明らかにされていない。そこで本研究では先行研究の手法を用い理論的に検証し、従来燃料と比較した。また、低融点燃料の燃料後退速度を実験的に測定した。その結果、理論的検証ではスケール効果に影響を与えるのはG·Dなどの操作パラメータであると考えられる。実験的検証では、実験結果を参考文献と比較し燃料後退速度が高く、要因として酸化剤質量流束のデータの範囲が違ったこと、そして燃料の端面が燃えていたことと燃料に穴が開いていたことが考えられる。

1. はじめに

化学推進ロケットには固体ロケット、液体ロケット、ハイブリッドロケットの3種類がある。これまでの宇宙へ打ち上げには固体ロケット、液体ロケットが使われてきた。しかし現在は小型衛星の需要増加に伴い、ロケットの小型化、低コスト化が求められている。それにより、安全性が高くコストの低いハイブリッドロケットが注目されるようになった。しかし、ハイブリッドロケットは燃料後退速度がひくいため推力が低いという最大の欠点がある。そこで、従来燃料である末端水酸基ポリブタジエン(HTPB)やポリエチレン(PE)などに比べ高推力を得られる低融点燃料が期待されている。

現在までハイブリッドロケットの燃料として使用されてきたHTPBやPEなどのハイブリッドロケットのスケール効果は先行研究により既に報告されている¹⁾、低融点燃料のスケール効果はまだ解明されていない。低融点燃料のスケール効果が明らかになると実際に打ち上げたいサイズのロケットを作って燃焼実験を実施する必要がなく、縮小サイズのロケットから実際のロケットの推進性能をシミュレーションができるようになる。つまり、開発にかかる労力、時間、費用を削減することが可能になる。

本研究の目的は低融点燃料の燃料後退速度を実験により測定し燃料後退速度とスケールの関係を求めることである。

2. スケール効果

一般的にハイブリッドロケット燃焼器（主に燃料ポート径： D ）が大きくなると同じ質量流束に対して燃料後退速度 \dot{r} が減少する傾向があることが知られている。スケール効果を考える際に最も重要な条件を以下に示す。

- ・幾何学的類似性：

$$L \propto D \quad (1)$$

- ・酸化剤質量流量はポート径に比例：

$$\frac{\dot{m}_{ox}}{D} = const \text{ or } G \cdot D = const \quad (2)$$

- ・同じ酸化剤と燃料の組み合わせ

ここで、 L は燃料長さ[mm]、 D はポート径[mm]、 \dot{m}_{ox} は酸化剤質量流量[kg/s]、 G は推進剤質量流束[kg/m²・s]である。低融点燃料にこれらの関係を適用してスケール効果を求める。

3. 低融点燃料の燃料後退速度

3.1. エントレインメント現象

低融点燃料は従来燃料に比べ高い燃料後退速度を得ることができる。この要因の1つとして低融点燃料が燃焼した際に発生するエントレインメント現象が挙げられる。ここでエントレインメント現象とは燃料表面にできる液層がガス流れによって剪断され液滴が同伴することを指す(図1)。エントレインメント現象が起こる要因は低融点燃料の液層が低粘度、低表面張力であることが挙げられる。

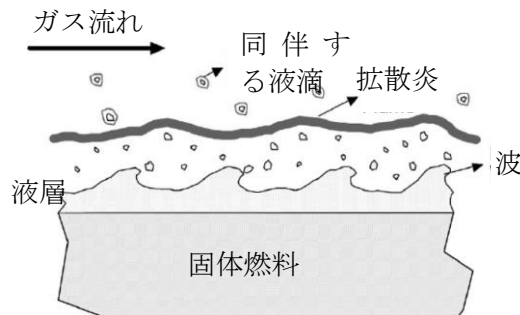


図1 低融点燃料のエントレインメント現象³⁾

3.2. 燃料後退速度

低融点燃料は気化後退速度 \dot{r}_v [mm/s]に加えエントレインメント後退速度 \dot{r}_{ent} [mm/s]を考える必要がある。以下に本研究で用いたそれぞれの後退速度の式を示す。(本章で用いた式は参考文献2から引用)

- ・気化後退速度(\dot{r}_v):

$$\frac{2}{2 + 1.25B_g^{0.75}} = \frac{C_{B1}}{C_{B1} + C_{B2}(\dot{r}_v/\dot{r}_{cl})^{0.75}} \quad (3)$$

また、係数 C_{B1} 、 C_{B2} 、古典的な後退速度 \dot{r}_{cl} は次のように定義される。

$$C_{B1} \equiv \frac{2}{2 + 1.25B^{0.75}} \quad (4)$$

$$C_{B2} \equiv \frac{1.25B^{0.75}}{2 + 1.25B^{0.75}} \quad (5)$$

$$\dot{r}_{cl} = \frac{0.03\mu_g^{0.2}}{\rho_s} \left(1 + \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_c}\right) B C_{B1} G^{0.8} z^{-0.2} \quad (6)$$

ここで、 B_g は蒸発ブローパラメーター、 C_{B1} 、 C_{B2} は吹き出し補正係数、 \dot{r}_{cl} は古典理論によって予測された後退速度[mm/s]、 B はブローパラメーター、 μ_g はガス粘度[N・s/m²]、 ρ_s は燃料密度[kg/m³]、 \dot{Q}_r/\dot{Q}_c は放射と対流の熱伝達比、 G は質量流束[kg/m²・s]、 z は1/2燃料長さ[m]である。
 ・ エントレインメント後退速度(\dot{r}_{ent}):

$$\dot{r}_{ent} = 1.41 \times 10^{-3} (X_e - 2109) \dot{m}_l / \rho_l \quad (7)$$

ここで、 X_e 、 \dot{m}_l 、 P_d は次の式から求める。

$$X_e = \frac{P_d^{0.5}}{\sigma \left(\frac{T_g}{T_v}\right)^{0.25}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_l = \frac{P_d c_f h^2 \rho_l}{2\mu_l} \quad (9)$$

$$P_d = \frac{G^2}{2\rho_g} \quad (10)$$

ここで、 X_e はエントレインメントパラメーター[N^{-1/2}]、 \dot{m}_l は単位幅あたりの溶融層を流れる液体の質量流量[kg/m・s]、 ρ_l は液体密度[kg/m³]、 P_d は動圧[Pa]、 σ は表面張力[mN/m]、 T_g/T_v は平均気相温度と気化温度の温度比、 c_f 表面摩擦係数、 h は溶融層厚さ[mm]、 μ_l は液体粘度[mPa・s]、 G は質量流束[kg/m²・s]、 ρ_g はガス密度[kg/m³]である。

また、総燃料後退速度は気化後退速度とエントレインメント後退速度の和とする。

4. 実験装置

実験は横向きで行った。燃焼器全長は 266.7[mm]、燃焼室長さ 100.7[mm]、燃焼器最外径 175[mm]、燃焼室内径は 130[mm]である。燃焼室圧力は燃焼室後方で計測した。

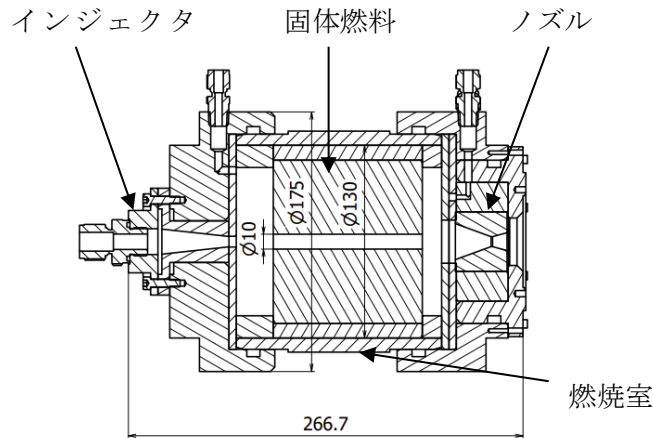


図2 燃焼器断面図

5. 実験装置

5.1. 理論的検証の条件

本研究の理論的検証に適用したスケール効果の条件を以下に示す。 L/D と $G \cdot D$ の値は後に比較するPEと同じ条件とする。

- $L/D = 9 \sim 20$
- $G \cdot D = 3.93 [\text{kg/m} \cdot \text{s}]$
- 燃料：固体ペンタン²⁾⁴⁾，酸化剤：酸素

5.2. 実験的検証の条件

本研究の理論的検証に適用したスケール効果の条件を表 1 に示す。酸化剤はガス酸素，固体燃料はパラフィンワックス（日本精蠟製の FT-0070）を用いた。今回使用した燃焼器はスケール 2 までを測定できるように設計したが、本論文に限ってはスケール 1 の測定した。

6. 実験結果及び考察

6.1. 理論的検証の結果と考察

本研究の条件下でのポート径 D [mm] と各燃料後退速度 (\dot{r}_v , \dot{r}_{ent} , \dot{r}_{total}) [mm/s] を図 3 に示す。ここで、質量流束 G [kg/m²·s]，1/2 燃料長さ z [mm]，熔融層厚さ h [mm] はスケールによって変わる変数である。PE のスケール効果との比較を図 4 に示す。ここで、PE とペンタンでは燃料後退速度が大きく異なるため、ポート径 $D=9.48$ [mm] でのそれぞれの燃料後退速度を 100% とし、それぞれの燃料後退速度の変化の割合を表している。図 4 から $D \leq 100$ [mm] ではペンタンの方がスケール効果を受けにくいことが分かる。

ペンタンのエントレインメント後退速度 (\dot{r}_v)，気化後退速度 (\dot{r}_{ent}) と PE のスケール効果を比較したものを図 6 に示す。図 6 からエントレインメント後退速度は気化後退速度に比べスケール効果を受けにくいことが分かる。また、PE とペンタンの気化後退速度のスケール効果が一致していることからペンタンが PE に比べスケール効果を受けにくい要因はエントレインメント後退速度であると考えられる。

表 1 実験条件

スケール比	1	1.5	2
L/D	10.07	10.07	10.07
$G \cdot D$	3.93	3.93	3.93
ポート径 [mm]	10	15	20
酸化剤質量流束 [kg/m ² s]	393	262	196.5
酸化剤質量流量 [kg/s]	0.03	0.05	0.06
燃焼時間 [s]	3	6.75	12
燃焼室圧力 [MPa]	2	2	2
燃料長さ [mm]	100.7	151.05	201.4

次に $G \cdot D$ が異なる値($G \cdot D = 10, 20[\text{kg/m} \cdot \text{s}]$)について考える. 図 5 に $G \cdot D = 3.93, 10, 20[\text{kg/m} \cdot \text{s}]$ のときの気化後退速度, エントレインメント後退速度とポート径 D の変化の割合を示す. 気化後退速度の変化の割合は $G \cdot D$ がどの値でも同じだが, エントレインメント後退速度は $G \cdot D$ が大きいほどスケール効果の影響が小さくなっている. また $G \cdot D = 10, 20[\text{kg/m} \cdot \text{s}]$ では変化が小さいことから $G \cdot D$ を大きくすることによるスケール効果の影響は収束していくと考えられる.

また, ペンタンとパラフィンのスケール効果を比較したものを図 6 に示す. 計算には参考文献 1 のパラフィンの値, 不明なパラメータはペンタンで使用した値を使っている(\dot{Q}_r/\dot{Q}_c など). 図 6 のペンタンとパラフィンの総後退速度がほぼ同じ形であることからスケール効果の影響は同程度だといえる. よって物性値が変わると燃料後退速度自体の違いはあるが, スケール効果にはほぼ影響がないと考えられる. これらのことからスケール効果へ影響を与えるのは物性値ではなく, $G \cdot D$ などの操作パラメータであると考えられる.

6.2. 実験的検証の結果と考察

表 2 にスケール 1 の実験結果を示す. 表 2 より酸化剤質量流束が実験条件より低い値となり, 料後退速度が実験条件と異なった. 原因として特性排気速度 C^* が実験条件では 1300 m/s であったが実験結果では 1000 m/s であったことが酸化剤質量流束が落ちたと考えられる.

次に図 8 に本実験使用した FT-0070 を参考文献 5)の燃料後退速度をと比較したグラフを示す. 比較した参考文献よりも燃料後退速度が高くなった要因を考える. 比較した $\dot{r} = 0.091G^{0.69}$ が酸化剤質量流束が最大 $30 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であったが, 本実験では酸化剤質量流束が実験 2 回とも最大約 $380 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であり比較したものよりデータの範囲が違うためだと考えられる. また, 図 9, 10 のように燃料の端面が燃えていたことと燃料に穴が開いていたことが考えられる. 穴が開いた要因としては, 成型時に気泡が入ったのではないかと考えられる. 対策として燃料成型時に真空にして成型する.

表 2 実験結果

	実験条件	燃焼実験	燃焼実験
実験回数	-	1 回目	2 回目
酸化剤質量流束 [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]	393	101.05	94.38
酸化剤質量流量 [kg/s]	0.03	0.032	0.032
燃焼時間 [s]	3	3.04	3.08
燃焼室圧力 [MPa]	2	1.6	1.52
燃料後退速度 [mm/s]	5.61	3.29	3.55

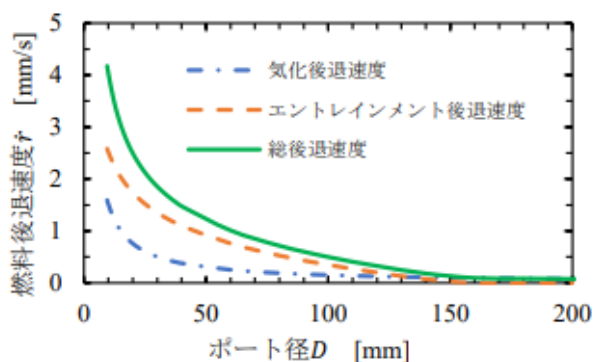


図3 本研究の条件下でのペンタン-酸素のスケール効果

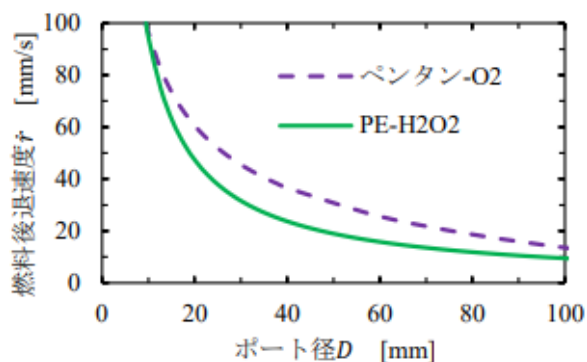


図4 ペンタンとPEのスケール効果

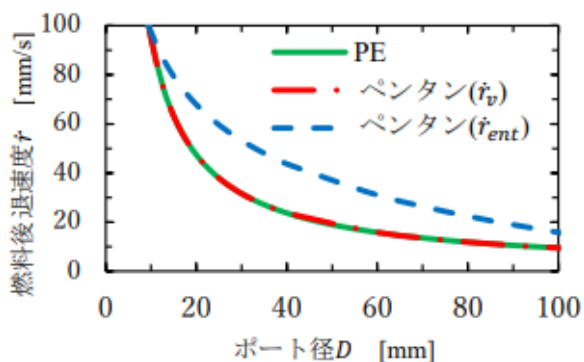


図5 同条件下でのペンタンとパラフィンのスケール効果の比較

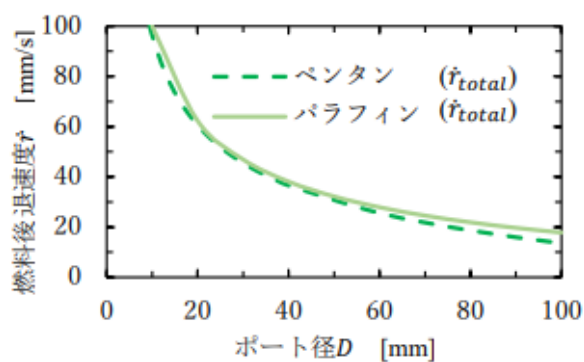
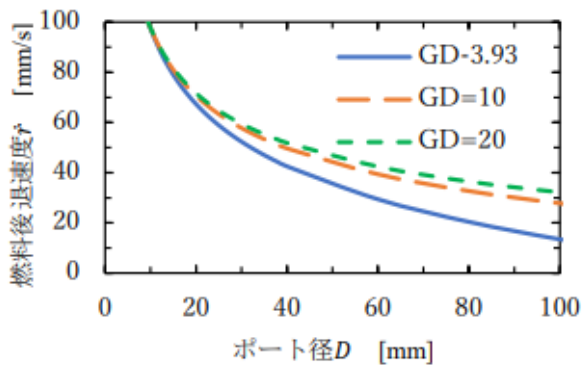
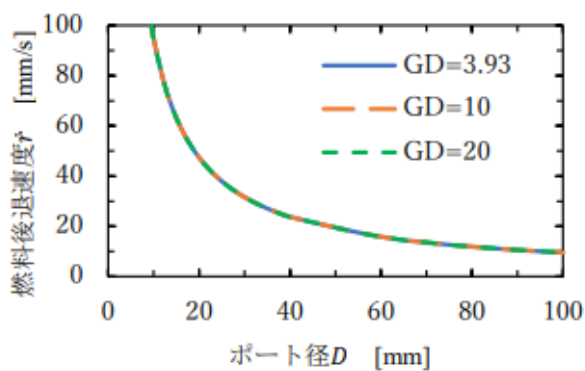


図6 ペンタン(\dot{r}_v, \dot{r}_{ent})とPEのポート径Dに対する燃料後退速度 \dot{r} の変化の割合



a) エントレイメント後退速度



b) 酸化後退速度

図7 $G \cdot D = 3.93, 10, 20$ [kg/m \cdot s]のポート径Dに対するペンタンの \dot{r}_v と \dot{r}_{ent} の変化の割合

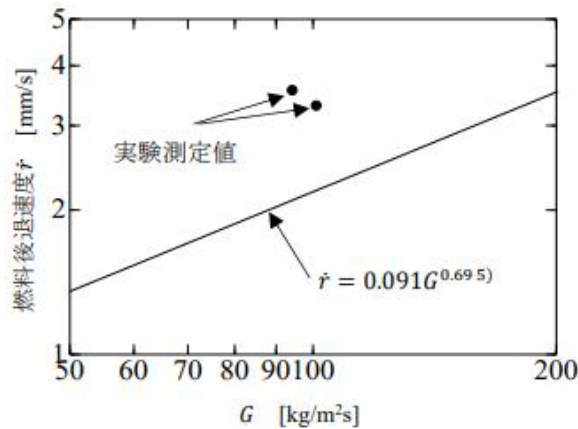


図 8 FT-0070 の \dot{r} G のグラフ



図 9 実験後 1 回目の燃料



図 10 実験後 2 回目の燃料

7. 結言

低融点燃料のスケール効果について検証し、今回設定した条件の下では従来燃料に比べスケール効果を受けにくいことが分かった。また、気化後退速度 \dot{r}_v は従来燃料の燃料後退速度と同程度のスケール効果で、エントレインメント後退速度 \dot{r}_{ent} がスケール効果を受けにくい要因であると考えられる。同じ L/D で $G \cdot D$ を大きくするとエントレインメント後退速度 \dot{r}_{ent} がスケール効果を受けにくくなった。同じ条件でパラフィンと比較するとほぼ同じスケール効果となりスケール効果への影響を与えるのは、 $G \cdot D$ などの操作パラメータであると考えられる。

スケール 1 の燃焼実験を行い酸化剤質量流束が実験条件より低い値となった。原因として特性排气速度が実験条件よりも低い値となったためだと考えられる。図 8 より参考文献⁵⁾と比較し燃料後退速度が今回の実験では高い値となった。要因として酸化剤質量流束のデータの範囲が違ったこと、そして燃料の端面が燃えていたことと燃料に穴が開いていたことが考えられる。

謝辞

本研究は公益財団法人柿原科学技術研究財団の助成を受けて実施されました。感謝申し上げます。ものづくりセンターの古賀先生には、機械加工から実験装置の製作までご指導いただきました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) M. A. Karabeyoglu, D. Altman, B. J. Cantwell, “Combustion of Liquefying Hybrid Propellants : Part 1, General Theory,” JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 18, No. 3, pp610-620, 2002.
- 2) A. Gany, “Scale effects in hybrid motors under similarity conditions,” American Institute of Aeronautics, AIAA96-2846, 1996.
- 3) M. Kobald, C. Schmieder, H. K. Ciezki, S. Schleichriem, “Viscosity and Regression Rate of Liquefying Hybrid Rocket Fuels,” JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 33, No. 5, pp1245-1251, 2017.
- 4) M. A. Karabeyoglu, D. Altman, B. J. Cantwell, “Combustion of Liquefying Hybrid Propellants : Part 2, Stability of Liquid Films,” JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 18, No. 3, pp621-630, 2002.
- 5) 彦根,那賀川 “ハイブリッドロケット用パラフィン燃料の後退速度と燃焼のメカニズムに関する研究”, 東海大学紀要 工学部,50 卷, 2 号, pp169-173, 2011