

パラフィンワックスを用いたハイブリッドロケットの スケール比 1.0 及び 1.5 におけるスケール効果に 関する実験的研究

○小山路 大起(福岡大学・学), 安永 尚生(福岡大学・院), 川端 洋(福岡大学)

Experimental Study of Scale Effects on Hybrid Rockets Using Paraffin Wax at Scale Ratios of 1.0 and 1.5

Abstract

Scale effects of HTPB and other fuels that have been used as hybrid rocket fuels have been clarified. However, the scale effect of low-melting-point fuels has not yet been clarified. In this study, the fuel regression rate of paraffin wax at scale ratios of 1.0 and 1.5 were experimentally measured. As a result, the fuel regression rate at a scale ratio of 1.0 showed an error of approximately 2.3% from the theoretically derived fuel regression rate of pentane. At a scale ratio of 1.5, the fuel regression rate showed an error of approximately 1.4% from the theoretically derived fuel regression rate. As a result, the physical properties of paraffin wax are considered to be similar to those of pentane.

1. 諸言

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. しかし現在小型, 超小型衛星の需要増加に伴い¹⁾, ロケットの低コスト化が求められている. それによって比較的, 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低燃料後退速度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 (Hydroxyl terminated polybutadiene : HTPB) やポリエチレン (polyethylene : PE) などと比べ高推力を得られる低融点燃料が期待されている²⁾.

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³⁾. しかし, 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はまだ解明されていない. 本研究の目的は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を実験的に検証することである. 本研究により低融点燃料におけるスケール効果が明らかになると縮小サイズのロケットエンジンから燃焼実験結果を用いて, 実際のロケットエンジンの推進性能を高い精度でシミュレーションが可能であり, 開発にかかる労力, 時間, 費用を大幅に削減すること

が可能になる. 従来燃料 (HTPB, PEなど) の場合のスケール効果については参考文献³⁾で既に報告されているが, 低融点燃料のスケール効果についてはまだ解明されていないため, 本研究ではパラフィンワックス(FT-0070)を用いた実験的検証を行う.

2. 低融点燃料の燃焼メカニズム

2.1 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を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. エントレインメント現象とは酸化剤と, 反応した燃料のガス流れが燃料表面上(液相)に及ぼす剪断力によってできる液滴がガス流れに伴って燃焼することである(図1). また, 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.

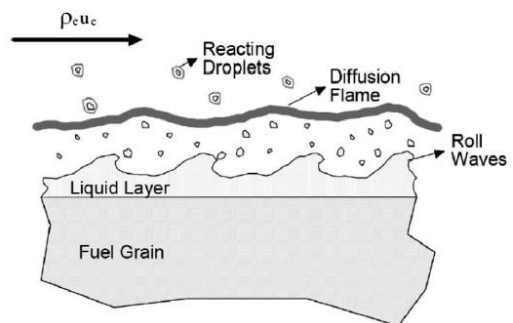


図1 低融点燃料のエントレインメント現象⁴⁾

3. スケール効果

3.1 従来燃料のスケール効果³⁾

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：

$$L \propto D \quad (3.1)$$

- ・酸化剤質量流量はポート径に比例：

$$\frac{\dot{m}_{ox}}{D} = const \text{ or } G \cdot D = const \quad (3.2)$$

従来燃料の燃料後退速度 \dot{r} [mm/s]とポート径 D [mm]の関係は次のように表される。

$$\dot{r}D = const \quad (3.3)$$

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。

3.2 低融点燃料のスケール効果

本研究では、従来燃料のスケール効果を求めた手法及び先行研究を基に実験条件を決定した^{3),5)}。

燃料長さ L [mm]、ポート径 D [mm]

$$\frac{L}{D} = 10.07 \quad (3.4)$$

酸化剤質量流束 G [kg/m²s]

$$G \cdot D = 3.93 \quad (3.5)$$

4. 実験条件・実験装置

4.1 実験条件

今回スケール比 1.0 ではポート径 10 mm、燃料長さを 100.7 mm とし、スケール比 1.5 ではポート径 15 mm、燃料長さを 151.1 mm と設定した。表 1 に実験条件を示す。先行研究⁵⁾による固体ペンタンの理論的検証を元に条件設定を行った。目標燃焼時間をスケール比 1.0 では 3.0 s、スケール比 1.5 では 6.75 s と設定して実験を行い、燃焼室圧力は 2.0 MPa を目標とした。

表 1 実験条件

スケール比	1.0	1.5
L/D	³⁾⁵⁾ 10.07	
G · D	³⁾⁵⁾ 3.93	
ポート径[mm]	10	15
燃料長さ[mm]	100.7	151.1
最大酸化剤質量流束 [kg/m ² s]	393	262
平均酸化剤質量流量[kg/s]	0.03	0.05
目標燃焼時間[s]	3.0	6.75
目標燃焼室圧力[MPa]	2.0	

4.2 実験装置

酸化剤供給、点火の制御、電磁弁及び空圧弁の制御は LabVIEW を用いた。酸化剤供給系の配管図を図 2 に示す。メイン配管は 1/2 インチ、ガス窒素は 6mm チューブ、酸化剤供給配管は 1/2 インチのものを使用している。酸化剤はガス酸素を使用しており図 3 の左から燃焼器内部に送り込まれ中央にあるパラフィン燃料(日本精蠟製：FT-0070)を燃焼したあとノズルから燃焼ガスが排気される。

初期ポート断面積とノズルスロート断面積比はスケール比 1.0 では 3.392、スケール比 1.5 では 4.965 の値である。この断面積比が小さいと燃料ポートでチョークする場合があるため留意した。また、燃料の端面を可能な限り守るために断熱材を挟み、インジェクションは出口径と合わせている。断熱材はベークライト、ノズルはグラファイトを使用している。

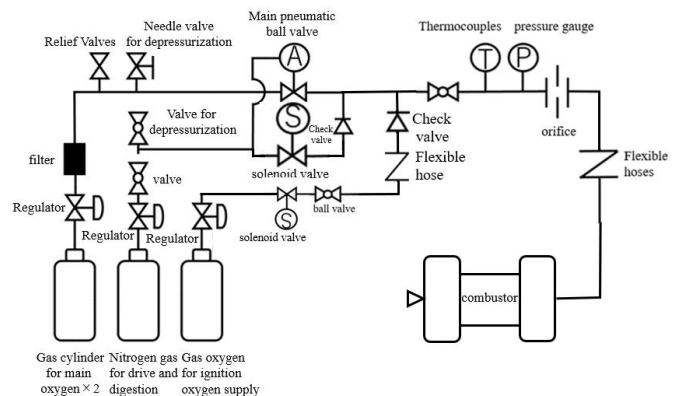


図 2 酸化剤供給系の配管図

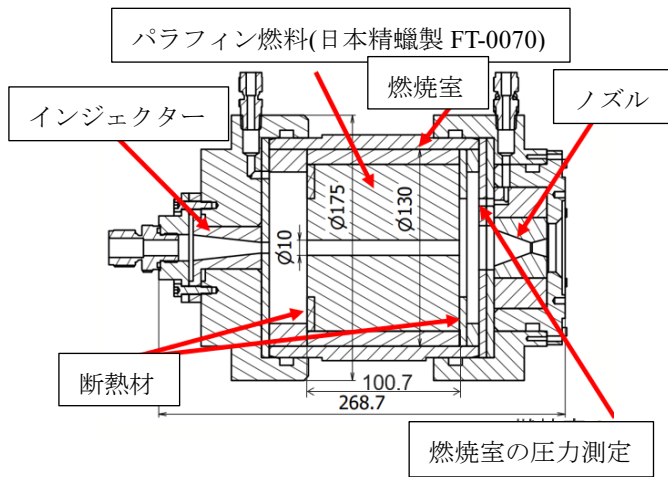


図3 スケール比 1.0 の燃焼器断面図

5. 結果・考察

5.1 燃焼実験結果

図4に平均燃料後退速度とポート径の関係を示す。○がスケール比 1.0, □がスケール比 1.5 の燃焼実験結果である。また、実線は先行研究で行った固体ペンタンの理論的検証結果である⁵⁾。図4の FT-0070 と固体ペンタンは低融点燃料ではあるが異なる燃料である。同じ低融点燃料と比較を行うため、先行研究で理論的検証を行った低融点燃料(固体ペンタン)を載せている。また、実験値のばらつきは燃料成型精度の差と考える。理論的検証した固体ペンタンとパラフィンワックス(FT-0070)の実験値と比較を行った結果、スケール比 1.0 の燃料後退速度を比較したときの平均誤差は約 2.3%、スケール比 1.5 の燃料後退速度を比較したときの平均誤差は約 1.4%と実験結果から示された。このことから、FT-0070 は理論的検証した固体ペンタンと同等のスケール効果を示すと考える。

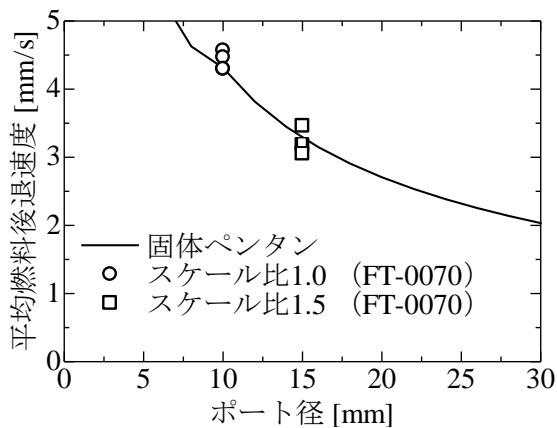


図4 理論計算による固体ペンタンのスケール効果⁵⁾と FT-0070 の燃焼実験結果

従来燃料 PE と低融点燃料である固体ペンタンとパラフィンワックスを比較した場合を図5のように比較を行った。また、縦軸である燃料後退速度 r は従来燃料(PE)と低融点燃料(ペンタン)では速度が大きく異なるため、ポート径 $D=9.48[\text{mm}]$ 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。燃焼実験の結果により低融点燃料である FT-0070 は PE に比べ、ポート径 10~100mm 程度まではスケール効果の影響を受けにくいことが考えられる。また FT-0070 は固体ペンタンと同等のスケール効果を示された。今後、パラフィンワックス(FT-0070)の物性値を測定し、理論的検証を行い比較する。

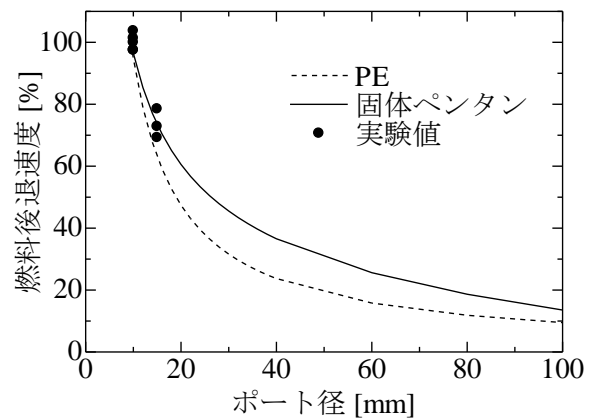


図5 従来燃料 PE と低融点燃料(固体ペンタン, パラフィンワックス)の比較

5.2 考察

表2は、低融点燃料である固体ペンタンの代表的な物性値である。固体ペンタンの燃料後退速度に与える要因として、液層の表面張力と液体粘度の物性値が影響を与える^{2),5)}。燃焼実験結果によって理論的計算した固体ペンタンと近い燃料後退速度であった。そのことから、FT-0070 は液体粘度や表面張力などで、燃料後退速度に顕著な影響を与える物性値は、固体ペンタンの物性値と近い値だと考える。今後 FT-0070 の表面張力と粘度の測定を行い、理論的検証を行う。

表2 固体ペンタンの燃料後退速度に与える代表的な物性値²⁾

液相の表面張力	14.3	[mN/m]
液体粘度	0.46	[mPa·s]

6. 結言

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はまだ解明されていないため、本論文では、低融点燃料のスケール効果を調べるためスケール比 1.0 及びスケール比 1.5 の燃焼実験を行い、低融点燃料であるパラフィンワックス(FT-0070)の燃料後退速度とスケールの関係を調査することを目的とした。結果として FT-0070 の燃料後退速度は固体ペンタンの理論的計算値との平均誤差がスケール比 1.0 では誤差 2.3%、スケール比 1.5 では誤差 1.4%となった。また従来燃料と比較したとき、低融点燃料はスケール効果の影響を受けにくく、実験結果から固体ペンタンと同等のスケール効果を示すことが考えられる。そのことから、低融点燃料の燃料後退速度に顕著な影響与える物性値は表面張力や粘度などであり、FT-0070 と固体ペンタンの物性値は近い値だと考えられる。今後の展望として、パラフィンワックスのスケール効果を調査するため、スケール比 2.0 の燃焼実験を行う。FT-0070 の表面張力と粘度の測定、理論的計算を実施、FT-0070 の燃焼実験結果と理論的計算結果を比較する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、機械加工について多大なる助言とご指導いただきましたモノづくりセンターの古賀啓太先生に感謝申し上げます。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。

参考文献

- 1) ケンプス ランドン, 影山 理沙, 脇田 督田, 永田 晴紀, “超小型宇宙機用ハイブリッドロケット推進機の開発” 日本機械学会 2020 年度年次大会 講演論文集, J19121, 2020.
- 2) Karabeyoglu, M. A., Altman, D., and Cantwell, B. J. “Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 3, pp. 610–620, 2002.
- 3) A Gany, “Scale effects in hybrid motors under similarity conditions,” *American Institute of Aeronautics*, AIAA96-2846.
- 4) M. Kobald, C. Schmierer, H. K. Ciezki, S. Schlechtriem, “Viscosity and Regression Rate of Liquefying Hybrid Rocket Fuels, ” *JOURNAL OF*

PROPULSION AND POWER, Vol. 33, No. 5, pp1245-1251, 2017.

- 5) 市山 哲史, 川端 洋 “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理論的研究” 令和 2 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2020-008, 2021.