

星型フラクタルポートを用いたハイブリッドロケットグレインの局所後退速度 Local Fuel Regression Rate of Hybrid Rocket Grain with Star Fractal Port

本目将大, 内島圭祐, 館山哲也, 西野沙也佳, 藤方優樹, 高野敦, 船見祐揮 (神奈川県)
Shota Homme, Keisuke Uchishima, Tetsuya Tateyama, Sayaka Nishino, Yuki Fujikata, Atsushi Takano and
Yuki Funami (Kanagawa University)

Abstract

A hybrid rocket has a technical problem of slow fuel regression rate. In order to overcome this problem, a solid fuel grain with a star fractal port, which has large surface area, is employed. Combustion tests of the hybrid rocket engine using this grain were performed and local regression rate was evaluated. The grains were made with 3D printer using ABS resin material. After the tests, the burned grains were sliced and the thickness of each part of them was measured with a vernier caliper. Local regression rate was calculated with the thickness and the combustion time. As a result, the local regression rate of the star fractal port tends to be high near the head end of the port. It was also found that the local regression rate of the concave part of the star fractal is higher than that of the convex part.

1. 研究目的

ハイブリッドロケットとは固体燃料グレインのポート内へ液体または気体酸化剤を供給することによって化学反応を起こし燃焼ガスを発生させ、ノズルで高速に加速された燃焼ガスを噴射することで推力を得るロケットである。推進剤として火薬類を用いないため比較的安全であり、運用コストを削減できるなどの特徴をもつ。しかし、ハイブリッドロケットエンジンには燃料後退速度が遅いという技術的課題もある。燃料後退速度とは固体燃料グレインが気化し減少する速さである。燃料後退速度が遅いということは発生する燃焼ガスも少なくなり、結果として十分な推力が得られない。

先行研究ではグレイン断面の孔形状（ポート形状）に関して、図 1 に示した表面積で優位な

星型フラクタルポート形状のグレインを使用することで燃料ガス発生量の改善が見られた¹⁾。また、酸化剤流量を変更した燃焼試験を実施し、時空間平均の燃料後退速度の評価を行った²⁾。

本研究では上述の先行研究を踏まえて、丸型および星型フラクタルポート形状を採用したグレインの燃焼試験を実施し、燃焼後のグレイン各部の厚さを計測することで局所燃料後退速度に関する知見を得ることを目的とする。



図 1 星型フラクタルポート¹⁾

2. 試験内容

図2に試験装置の概略図を示す。タンクに充填された酸化剤がオリフィスを含む管路を通してグレイン内部（燃焼室）に送り込まれグレインを燃焼させる。試験ごとにオリフィスは異なる絞り比のものと交換することで酸化剤質量流量を変更する。グレインのポート断面形状は一般的な形状である丸型と、表面積で優位な星型フラクタル形状の2種類で試験を行う。グレインの材料はABS（Acrylonitrile Butadiene Styrene）樹脂として、3Dプリンタ（米stratasys社、uPrintSE）により製作する。酸化剤には亜酸化窒素（ N_2O ）を使用する。燃焼試験前では図2右のL字の配管がノズルに挿入された状態でタイラップにより固定されており、燃焼試験直前にこの配管を通して酸化剤ボンベからタンクへと酸化剤が充填される。酸素による点火後にタイラップが焼き切れ、L字の配管が抜ける仕組みとなっている。L字の配管が抜けた後はタンクに充填された酸化剤による燃焼が開始される。

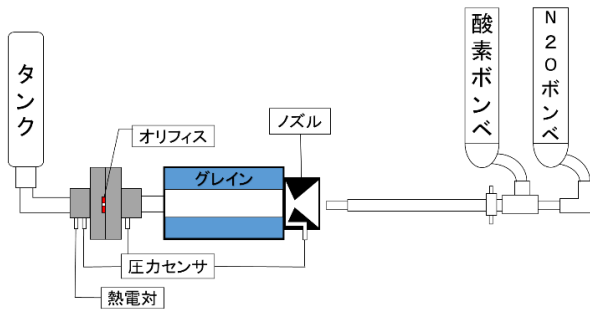


図2 試験装置の概略図

3. 局所燃料後退速度の推算方法

酸化剤噴出孔からの距離と燃料後退速度の関係および星形フラクタル断面の凹部や凸部の燃料後退速度の傾向を調べるために、燃焼後のグレインを輪切りにする。その後、ノギスで各位置の燃え残り厚さを計測することで局所燃料後退速度の算出を行う。図3に示すように丸型は計8ヶ所、星型フラクタル形状は凹凸部すべての12箇所の測定する。凹部、凸部の名称はポ-

ト形状を基準に名付けていることに注意する。この値の平均からポート半径を算出したものを r_a とする。

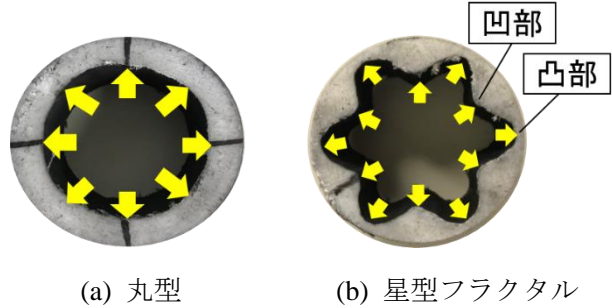


図3 グレイン厚さの測定箇所

燃焼前のポート半径を r_b 、燃焼時間を t とすると燃料後退速度 \dot{r} は式(1)のように求まる。

$$\dot{r} = \frac{r_a - r_b}{t} \quad (1)$$

4. 試験結果

表1に実施した試験条件を示す。丸型と星型フラクタル形状のそれぞれのポート形状についてオリフィスの絞り比を変更することで、初期酸化剤質量流束の異なる試験結果を得た。

表1 試験条件

	ポート形状	オリフィス絞り比	初期酸化剤質量流束 [kg/s/mm ²]
1	丸型	1	312
2	丸型	0.8	301
3	丸型	0.6	264
4	丸型	0.5	159
5	星型フラクタル	1	296
6	星型フラクタル	0.8	265
7	星型フラクタル	0.6	220
8	星型フラクタル	0.5	155

燃焼試験の代表例として、図4に星型フラクタル形状における初期酸化剤質量流束 265 kg/s/m²の場合の酸化剤質量流量、燃焼室圧力および推力の時間履歴を示す。平均すると酸化剤質量流量は約 0.25 kg/s、燃焼室圧力は約 1.8 MPa、推力

は約 0.5kN となっている。燃焼は正常に行われたと判断できる。

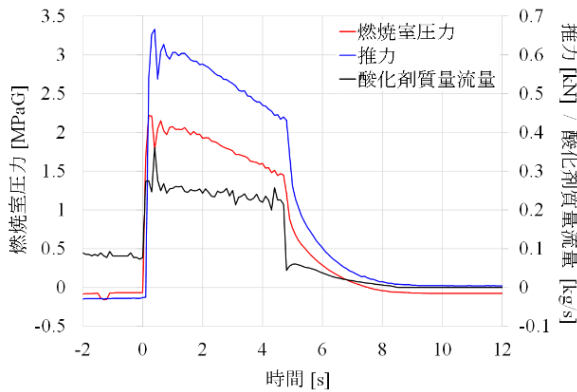


図 4 星型フラクタル形状，初期酸化剤質量流束 265 kg/s/m² の場合の流量，圧力および推力の時間履歴²⁾

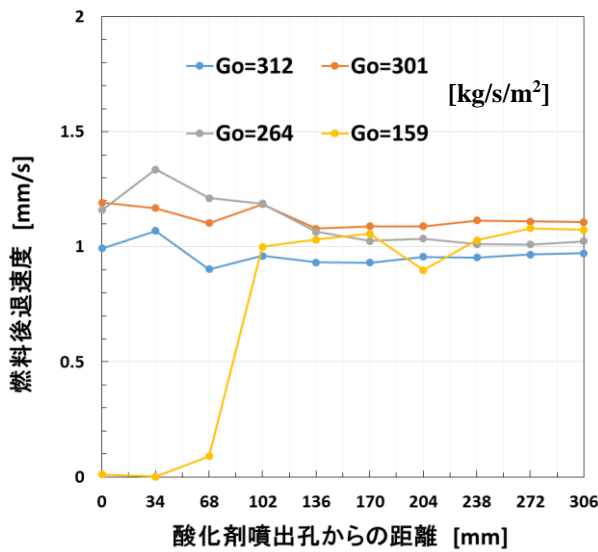


図 5 丸型の場合の局所燃料後退速度

図 5 は丸型の場合における酸化剤噴出孔からの距離に対する燃料後退速度である。図 5 から初期酸化剤質量流束 159 kg/s/m² の値を除くと下流部よりも上流部でやや燃料後退速度が高い傾向があり，下流部では燃料後退速度が一定になる傾向がある。初期酸化剤質量流束 159 kg/s/m² の値はオリフィスの絞り比を最も絞ったときの値である。図 6 のように酸化剤噴出孔は 11° の傾いた状態で開いているため，酸化剤

はグレインに対して斜めに噴射している。そのため酸化剤流れはグレイン表面に衝突することが考えられるが，初期酸化剤流束 159 kg/s/m² の場合は酸化剤の勢いが弱く，グレインに接触する位置が下流側に移ったために，図 5 のように上流部では燃えなかった可能性が考えられる。

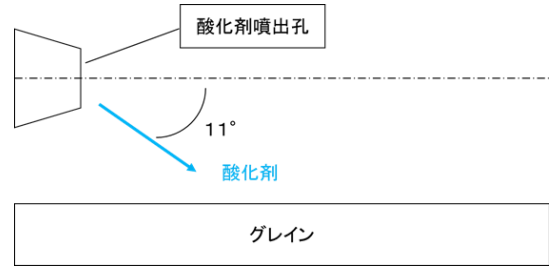


図 6 酸化剤噴射角度

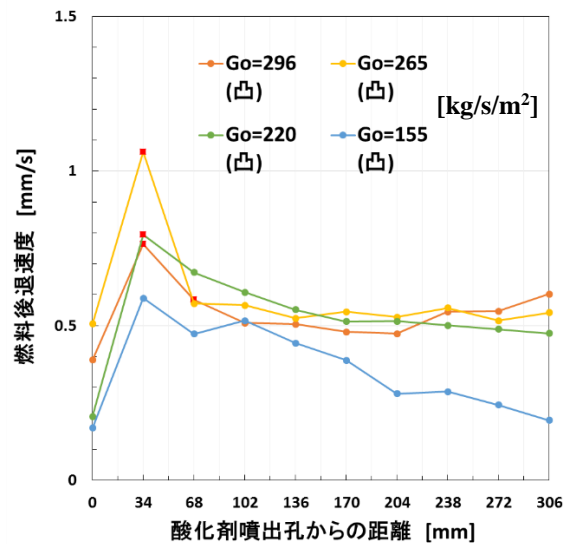


図 7 星型フラクタル形状の凸部における局所燃料後退速度

図 7, 8 はそれぞれ星型フラクタルの凸部と凹部の酸化剤噴出孔からの距離に対する燃料後退速度である。図 7 から分かるように，距離 0 mm 地点を除くと下流部よりも上流部で燃料後退速度が高い傾向がある。また，初期酸化剤質量流束 155 kg/s/m² の値を除くと下流部では燃料後退速度が一定になる傾向がある。初期酸化剤質量流束 155 kg/s/m² の値は絞り比を最も絞ったときの値である。これらの傾向は図 8 に示した

凹部の局所燃料後退速度でも同様に見られる。

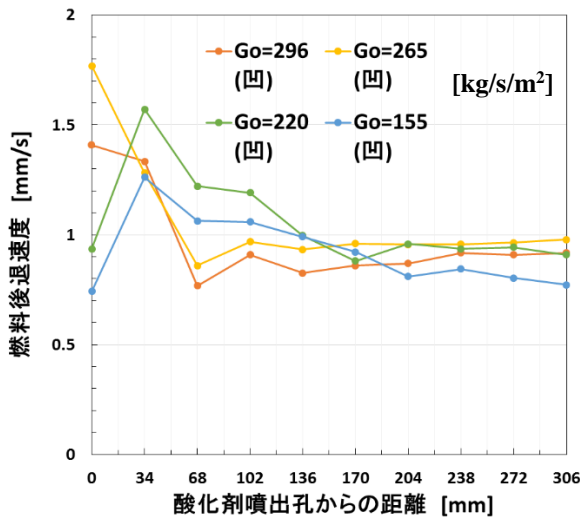


図 8 星型フラクタル形状の凹部における局所燃料後退速度

丸型と星型フラクタル形状を比較すると、丸型よりも星型フラクタル形状の方が上流部の後退速度が高くなる傾向が強いことが分かる。

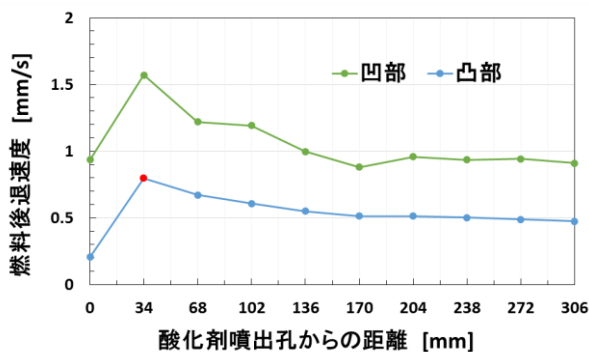


図 9 星型フラクタル形状，初期酸化剤質量流束 220 kg/s/m²における凸部および凹部の局所燃料後退速度の比較

図 9 は星型フラクタル形状における凸部と凹部の局所燃料後退速度の比較を示す。代表例として初期酸化剤質量流束が 220 kg/s/m²の場合を示す。図 9 のように凸部よりも凹部の燃料後退速度が高い傾向にある。このようになる原因としては、凸部では火炎が入り込みづらい、凹部では幾何学的に直径方向と周方向の両方から燃え広がるため見かけ上の燃料後退速度が高くな

っているといった理由が考えられる。また、初期酸化剤質量流束の異なる他の星型フラクタル形状の凹部と凸部の局所燃料後退速度を比較しても、同様な傾向が見られる。

5. 結論

丸型および星型フラクタル形状のポートを用いて燃焼試験を実施し、燃焼後のグレイン各部の燃え残り厚さを測定して局所燃料後退速度を求めた。その結果、いずれのポート形状でも一部例外を除くと下流部よりも上流部で局所燃料後退速度が高い傾向があり、特にその傾向は星型フラクタル形状に強く見られた。さらに、星型フラクタル形状では凸部よりも凹部の局所燃料後退速度が高い傾向があることが分かった。

謝辞

本研究は、共同研究 A「軽量・高性能ハイブリッドロケットエンジンの研究・開発」(研究代表者：高野敦)として神奈川県工学研究所より支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

3D プリンタによる固体燃料グレインの印刷においては丸紅情報システムズ株式会社の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 舘山哲也, 高野敦, 「CFRP 強化軽量ハイブリッドロケットエンジンの開発」, 航空宇宙技術, **17**, 2018, 237-243.
- 2) 船見祐揮, 内島圭佑, 本目将大, 高野敦, 「星型フラクタル形状グレインを用いたハイブリッドロケットの燃料後退速度特性」, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 1N03 (JSASS-2018-4303), 2018.