

# 多断面旋回流方式によるハイブリッドロケットエンジンの 燃料後退速度向上に関する研究

○大山 翔, 平田吉秀, 荒木健太郎 (九大院), 大江健悟 (九大学部), 麻生 茂, 谷 泰寛 (九大工),  
嶋田 徹 (JAXA)

## 1. 研究背景

2004年6月21日にScaled Composites社が開発したSpaceShipOneが高度約100kmに到達し、世界で初めて民間企業による有人宇宙飛行を実現して以来、近年ハイブリッドロケットに対する注目が高まっている<sup>1)</sup>。ハイブリッドロケットは安価で安全性が高いという利点を持つが、一方で燃料の平均後退速度および燃焼効率が低いという欠点を持つ。本研究室ではこれらの向上のために多断面旋回流方式を提案している<sup>2)</sup>。

## 2. 多断面旋回流方式

多断面旋回流方式の概要図を図1に示す。燃料グレインの側面に開けられたインジェクターポートを通して酸化剤を燃焼室内部に流入させることで旋回を伴った流れ場を燃焼室内に生じさせ、グレイン表面の境界層を薄くすることができる。多断面旋回流方式とはこれを多断面で行うことで、燃焼室内の旋回強さを維持しつつ、燃料グレインを均等に後退させることを目的とした燃焼方式である。

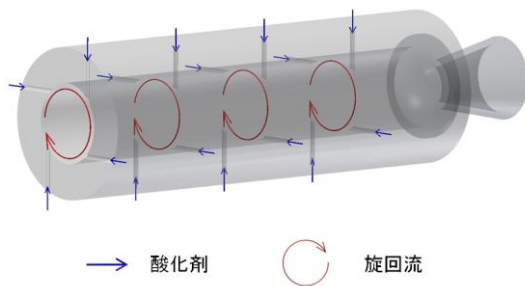


図 1 多断面旋回流方式概要図

## 3. 高密度ポリエチレン燃料を用いた実験

### 3.1. 研究目的

高密度ポリエチレン燃料を用いた本研究の目的としては、インジェクターポート部の改善による平均後退速度の向上で、大きく分けて2つの手法を用いた。

一つ目はインジェクターポートを燃料グレインの軸方向へ傾けた。これは一断面の旋回流において、Konkuk大学でインジェクターポートを30°下流側へ傾けたところ平均後退速度が向上したという研究成果からその多断面旋回流における影響を考えた

ものである<sup>3)</sup>。これまでに九州大学の燃焼実験で得られた燃焼後グレインから、各断面のグループの傾きについて統計を取ったところ上流側から-5°、0°、+30°、+30°傾いていたので、各断面をそれぞれ上流側から-5°、0°、+30°、+30°ずつ傾けた。

もう一つの手法はインジェクターポート部をコニカル形状にすることでインジェクターポート内の境界層を薄くし、インジェクターポート出口流速を高め、平均後退速度の向上を図ろうというものである。

### 3.2. 実験条件

本研究で用いた実験設備の概要図を図2に示す。酸化剤には気体酸素を使用した。酸化剤質量流量を測定するために酸化剤供給流路内にソニックオリフィスを設けた。また、燃焼室後部で燃焼室圧力を測定し、推力の測定のためにひずみゲージおよびロードセルを用いた。

各ケースにおける実験条件を表1に、本研究で用いた燃料グレインを図3に示す。インジェクターポートをグレイン軸方向に対し垂直に開けたグレインをType A、インジェクターポートを傾けたグレインをType B、インジェクターポート形状をコニカル形状にしたグレインをType Cとする。Type Cのグレインではインジェクターポート入口径が5 mm、出口径が2 mmである。また、Case 1およびCase 3ではソニックオリフィス径を2.5 mm、Case 2およびCase 4では3.5 mmのものを用いることで各グレイン形状の酸化剤質量流量の小流量側のデータと大流量側のデータを取得した。

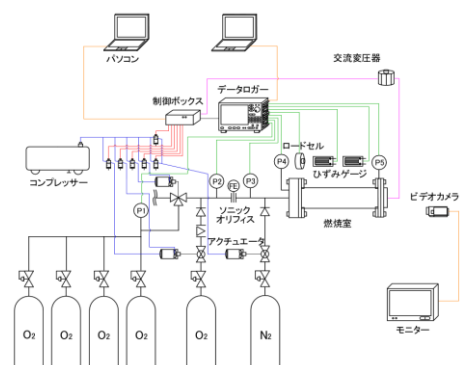


図 2 実験設備概要図

表 1 実験条件

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
グレイン長さ [mm]	200				
グレインの種類	A	B	B	C	C
酸化剤流入断面数	4				
インジェクターポート径 [mm]	2				
ソニックオリフィス径 [mm]	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5
酸化剤供給時間 [s]	6	4			

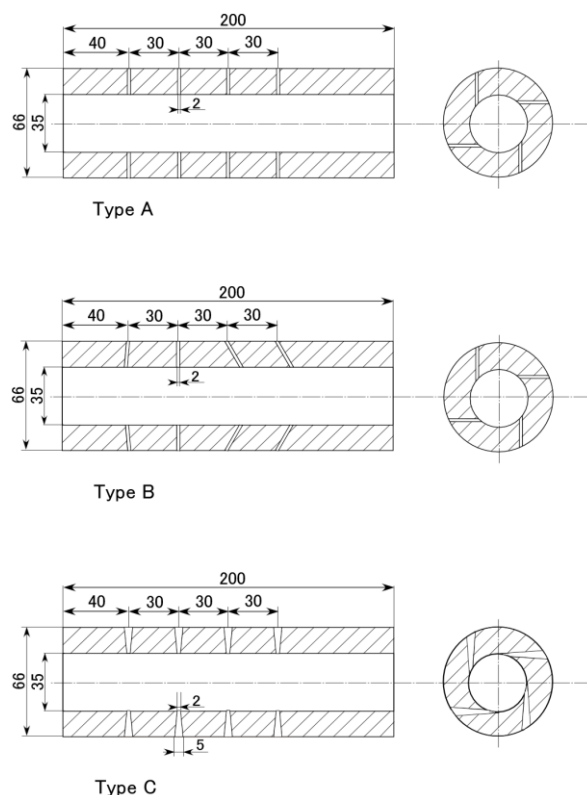


図 3 燃料グレインの断面図

### 3.3. 実験結果

Case 0の燃焼後グレインのグループの向きを図4に示す。この図のグループの向きから、インジェクターポートはグレイン軸方向に対し垂直にしているにも関わらず、他の断面および同一断面の別のインジェクターポートからの酸化剤の流入によって酸化剤は垂直にインジェクターポートから噴射されていないことが分かる。Case 0の燃焼室圧力推力履歴を図5に、平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係を図6に示す。Case 0のグレイン形状とこれまで使用したグレイン形状は同じであり、Case 0は酸化剤質量流量の大流量側のデータである。大流量側のデータを取ることで、多断面旋回流を用いたシングルポートグレインの平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係がより明確になった。Type Aのグレインを用いたCase 0の燃焼後グレインの断面図を図7に、Type Bのグレインを用いたCase 2の燃焼後グレインの断面図を図8に示す。酸化剤流入断面の上流から一断面目のグループをみると、イン

ジェクターポートを傾けたことでより均一に燃料グレインを後退させることができていることが分かる。次に三断面、四断面目をみると、Type Aのグレインではインジェクターポートから出た酸化剤が他の断面におけるインジェクターポートからの旋回流によって燃料グレイン壁面に押しつけられてから壁面に沿って流れるという流れ場が生じているが、Type Bのグレインではインジェクターポートを傾けたことで周方向の運動量の一部が軸方向の運動量となっているので、同一断面の旋回強さが弱まり、より広範囲のグレイン表面にグループを残したのちに壁面に衝突し、グレイン内壁に沿って偏向していることが分かる。Case 1およびCase 2の燃焼室圧力推力履歴を図9に示す。どちらも立ち上がり以外は定常な履歴を得ることができている。Case 1およびCase 2の平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係を図10に示す。インジェクターポートを傾けたことで平均後退速度の向上は見られなかった。これは周方向の旋回強さが弱まった影響と、より広範囲に旋回流の影響を与えた影響が打ち消しあった結果だと思われる。

続いてType Cのグレインを用いたCase 3およびCase 4の燃焼室圧力推力履歴を図11に示す。燃焼時間2秒からの履歴をみるとインジェクターポート径が増加したことにより、平均後退速度が低下し、燃焼室圧力推力履歴を一定に保つことができなかつたことが分かる。Type Cのグレインでは燃焼後グレインにインジェクターポート径の増大が顕著にみられ、燃焼後のインジェクターポート径の平均は7 mmであった。Case 3およびCase 4の平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係を図12に示す。インジェクターポート形状をコンカル形状にすることで、平均後退速度を1.1倍に向上することができた。

高密度ポリエチレン燃料を用いた実験における実験結果を表2に、それぞれの実験ケースで得られた $c^*$ 効率を図13に示す。インジェクターポートを傾けたことでCase 2では燃焼効率が向上し、1.0となったが、これは旋回流による燃焼室圧力増加<sup>4)</sup>を加味していない値である。

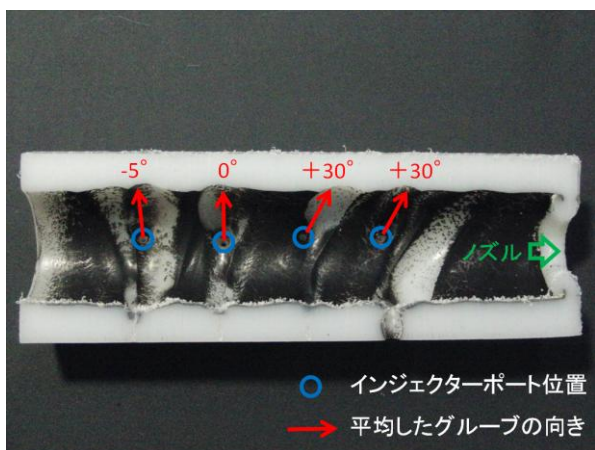
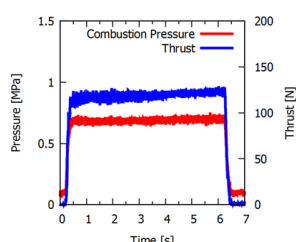
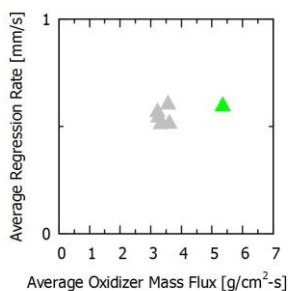


図 4 Case 0の燃焼後グレインのグループの向き



Case 0 (オリフィス径3.5mm)

図 5 Case 0の燃焼室圧力推力履歴



Average Oxidizer Mass Flux [g/cm<sup>2</sup>·s]

図 6 Case 0の平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係

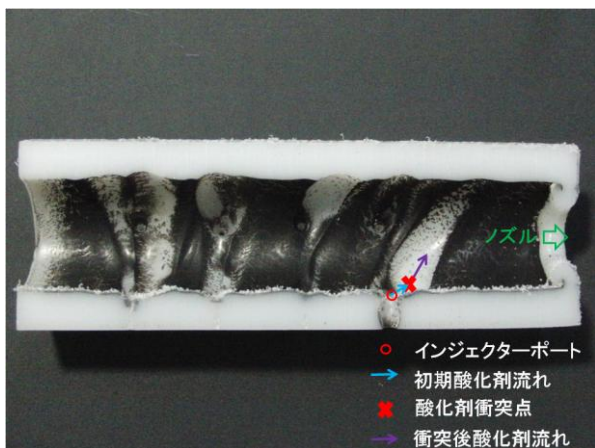


図 7 Case 0の燃焼後グレインの断面図

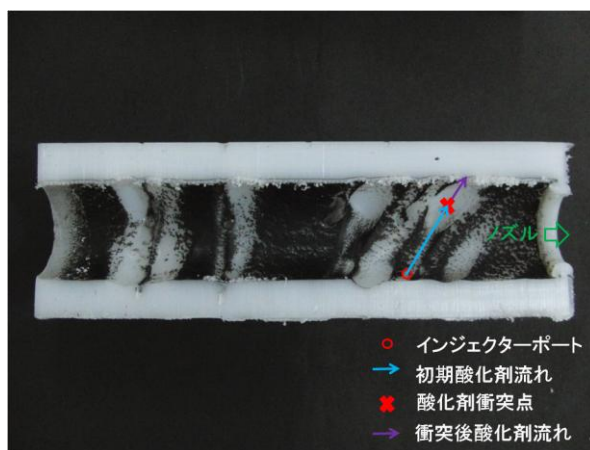
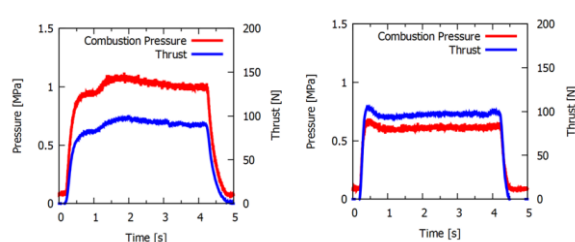


図 8 Case 2の燃焼後グレインの断面図

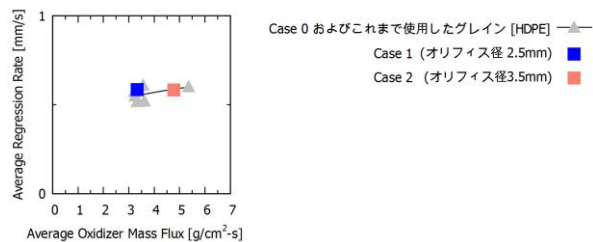
- インジェクターポート
- 初期酸化剤流れ
- \* 酸化剤衝突点
- 衝突後酸化剤流れ



Case1 (オリフィス径2.5 mm)

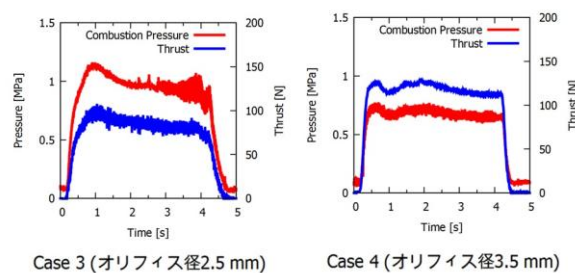
Case2 (オリフィス径3.5 mm)

図 9 Case 1、Case 2の燃焼室圧力推力履歴



Average Oxidizer Mass Flux [g/cm<sup>2</sup>·s]

図 10 Case 1およびCase 2の平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係



Case 3 (オリフィス径2.5 mm)

Case 4 (オリフィス径3.5 mm)

図 11 Case 3、Case 4の燃焼室圧力推力履歴



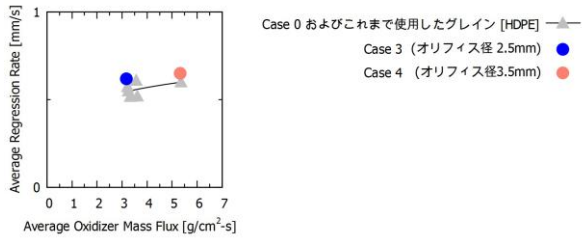


図 12 Case 3およびCase 4の平均酸化剤質量流速と平均後退速度の関係

表 2 実験結果

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
グレインの種類	A	B	B	C	C
インジェクターポート径[mm]	2		5→2		
酸化剤供給時間[s]	6		4		
燃焼室圧力[MPa]	0.7	1.0	0.6	0.9	0.6
平均後退速度[mm/s]	0.60	0.73	0.58	0.62	0.65
酸燃比 O/F	4.5	2.8	4.0	2.5	4.0
c* 効率	0.99	0.91	1.0	0.85	0.97
最大推力 [N]	127	115	130	113	178
実験比推力[s]	123	190	162	179	186

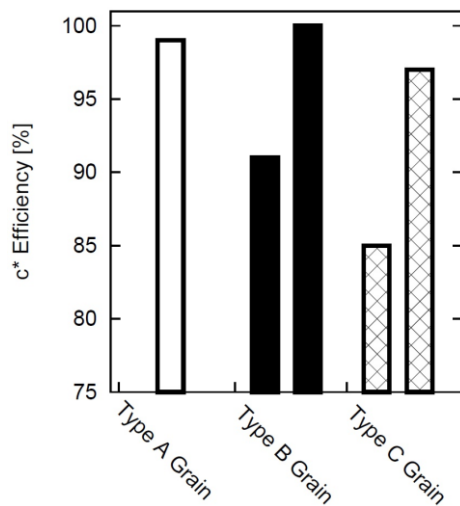


図 13 実験ケースで得られたc\*効率

#### 4. パラフィン燃料を用いた実験

##### 4.1. 研究目的

これまでの研究でパラフィン燃料を用いた多断面旋回流方式ではグループの影響によって注入断面付近では非常に高い燃料後退速度が得られることが明らかになった<sup>5)</sup>。このグループによる影響は平均後退速度を増加させる一方で、周方向や軸方向での燃料表面の不均一な後退の要因にもなりうるため原因となるインジェクターポートの最適な配置が求められる。

そこで、本研究の目的は旋回流を加えない多断面対向噴射方式 (Opposing Type) と多断面旋回流方

式 (Swirling Type A) の比較によって平均後退速度に対する旋回流による影響と多断面での酸化剤の注入による影響をそれぞれ理解することである。さらに、多断面旋回流方式において実機のスケールを考慮するとグレイン長さに対して酸化剤流入断面数の増加とともに経済的、時間的なコストの増加につながることは否めない。そこで、断面数を減らしてどの程度平均後退速度を維持できるかを実証するために酸化剤流入断面数を減らした多断面旋回流方式 (Swirling Type B) を用いた場合の比較を行う。

##### 4.2. 実験条件

パラフィン燃料を用いた燃焼実験も図2に示す実験設備の下で行われた。表3に各ケースにおける実験条件を、図14に本研究で用いた燃料グレインを示す。Opposing TypeとSwirling Type Aではインジェクターポート径は2mmである。また、Swirling Type B では酸化剤流入断面数を2つに減らし、インジェクターポート径の面積の総和がSwirling Type Aと同じになるように2.8mmとした。

表 3 実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
グレイン長さ[mm]	80					
グレインの種類	Swirling Type A			Opposing Type		
酸化剤流入断面数	4					
インジェクターポート径[mm]	2					
ソニックオリフィス径[mm]	3.5	3.5	2.5	2.5	2.5	3.5
酸化剤供給時間[s]	2.0	3.0	2.8	2.0	3.0	2.0

	Case 7	Case 8
グレイン長さ[mm]	80	
グレインの種類	Swirling Type B	
酸化剤流入断面数	2	
インジェクターポート径[mm]	2.8	
ソニックオリフィス径[mm]	3.5	3.5
酸化剤供給時間[s]	2.0	3.0

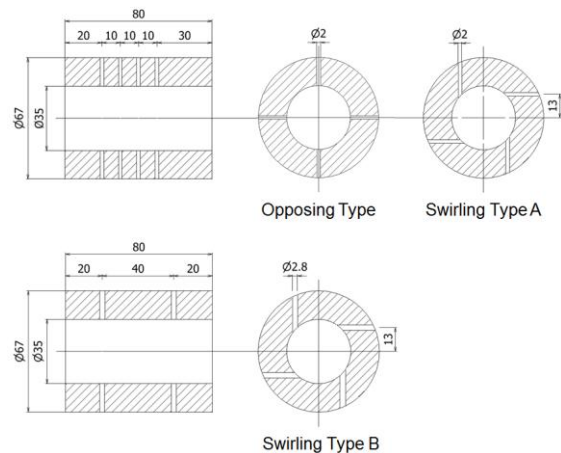


図 14 燃料グレインの断面図

##### 4.3. 実験結果

表4に実験結果を、図15にCase 2の燃焼室圧力

推力履歴を示す。また、図 1 6 に本研究で得られた平均後退速度と平均酸化剤質量流束の関係を示す。図 1 6 には比較のために Karabeyoglu らによって得られたパラフィン燃料を用いた従来の燃焼方式におけるデータ<sup>6)</sup>をプロットしている。

多断面对向噴射方式 (Opposing Type) を用いた場合の平均後退速度は、従来の燃焼方式を用いた場合の平均後退速度の約2倍高い値が得られた。また、多断面旋回流方式 (Swirling Type A) を用いた場合の平均後退速度は多断面对向噴射方式 (Opposing Type) を用いた場合の約2倍、従来の燃焼方式を用いた場合の約4倍高い値が得られた。図 1 7 に Swirling Type A と Opposing Type の燃焼終了後の燃料グレインの表面の様子および周方向断面における流れ場の比較を示す。どちらのグレインにもインジェクターポート周辺にグループが形成されており、多断面で旋回を加えるタイプでは特に深く、酸化剤流入断面での平均後退速度は高くなる。これは、酸化剤を噴射するインジェクターポート内部および周辺で形成された液相が噴流によって運ばれるため、グループが成長していると考えられる。また、グループの形成状況から Swirling Type A ではインジェクターポートから噴射された酸化剤は燃料内径が拡大した後は旋回による周方向の速度によって噴射方向が偏向していることが確認できる。さらに、Opposing Type では噴流による再循環領域が周方向および軸方向に3次元的に形成され、これによる酸化剤と燃料の混合促進も平均後退速度の増加に寄与する要因の一つであると考えられる。

また、Swirling Type B では酸化剤流入断面数が減ったにもかかわらず Swirling Type A と同程度の性能が得られた。図 1 8 に Swirling Type A と Swirling Type B の燃焼終了後の燃料グレインの表面の様子および軸方向断面における流れ場の比較を示す。特に旋回流の強い領域は酸化剤流入断面周辺であり、インジェクターポート径の大きな Swirling Type B ではグループの範囲が拡大したため、酸化剤流入断面が減少した一方で旋回流の強い領域が占める範囲は変わらなかったと考えられる。よって、グレイン長さを伸ばすようなスケールアップを行う場合において、性能を維持しながら、より酸化剤流入断面数を減少させることができた Swirling Type B の方がコスト的にも優れていると考えられる。

図 1 9 にそれぞれの実験ケースで得られた  $c^*$  効率を示す。多断面旋回流方式 (Swirling Type A、Swirling Type B) と比較して、多断面对向噴射方式 (Opposing Type) では同程度の酸化剤質量流量に対して平均後退速度が低下しているため、結果として燃料質量流量が低下したことで酸燃比が向上し

ている。理論的に特性排気速度が最大となる酸燃比には近づいたが、一方で  $c^*$  効率に関しては低下してしまう結果となった。このことから旋回流は平均後退速度を向上させるだけでなく、 $c^*$  効率も向上させている可能性がある。また、Swirling Type B の方が Swirling Type A より良い結果が得られており、Case 7 においては 97 % を達成した。

表 4 実験結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
グレインの種類	Swirling Type A			Opposing Type		
インジェクターポート径[mm]	2					
酸化剤供給時間[s]	2.0	3.0	2.8	2.0	3.0	2.0
燃焼室圧力[MPa]	0.92	0.95	0.97	1.1	1.1	0.72
平均後退速度[mm/s]	4.4	3.9	3.2	2.3	2.0	2.6
酸燃比 O/F	1.4	1.5	0.99	1.8	2.0	2.6
$c^*$ 効率	0.92	0.91	0.85	0.83	0.85	0.83
最大推力 [N]	265	256	135	119	132	221
実験比推力[s]	171	184	131	157	165	165

	Case 7	Case 8
グレインの種類	Swirling Type B	
インジェクターポート径[mm]	2.8	
酸化剤供給時間[s]	2.0	3.0
燃焼室圧力[MPa]	0.91	0.91
平均後退速度[mm/s]	4.5	3.7
酸燃比 O/F	1.3	1.5
$c^*$ 効率	0.97	0.94
最大推力 [N]	254	298
実験比推力[s]	148	152

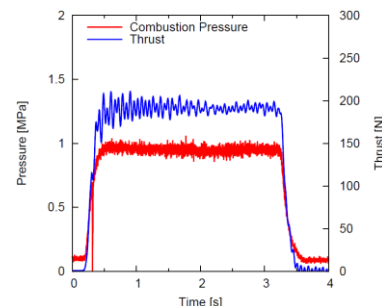


図 1 5 Case 2 の燃焼室圧力推力履歴

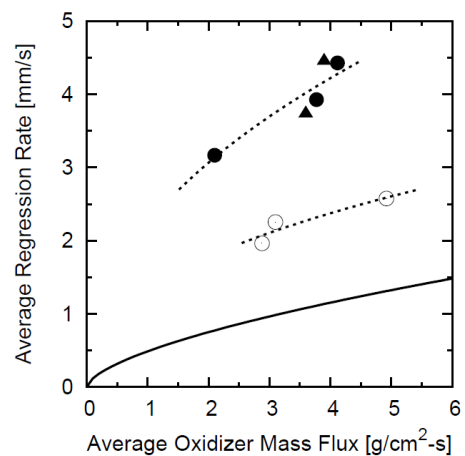


図 1 6 平均酸化剤質量流束と平均後退速度の関係

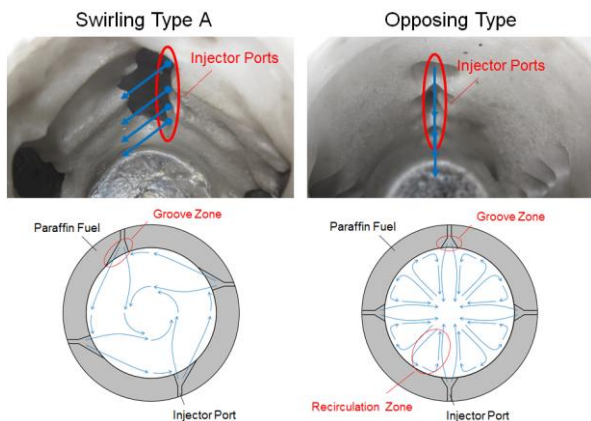


図 17 Swirling Type A と Opposing Type の燃焼終了後の燃料グレインの表面の様子および周方向断面における流れ場の比較

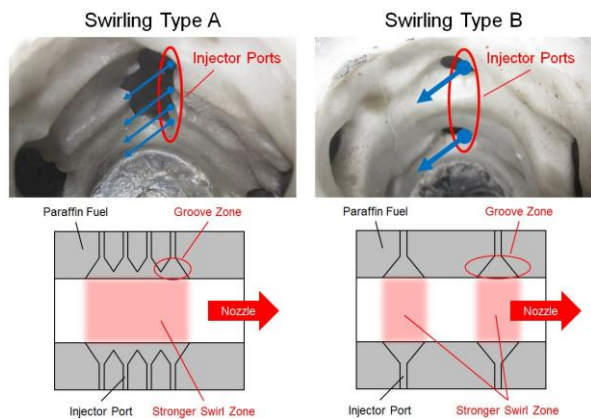


図 18 Swirling Type A と Swirling Type B の燃焼終了後の燃料グレインの表面の様子および軸方向断面における流れ場の比較

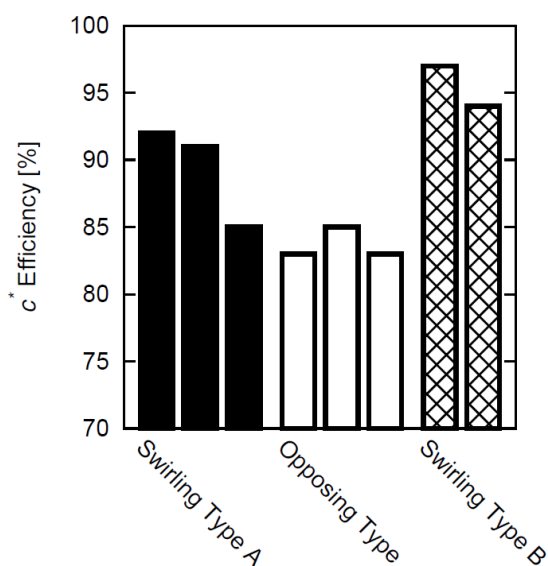


図 19 実験ケースで得られた  $c^*$  効率

## 5. 結論

高密度ポリエチレン燃料では、インジェクターポートを傾けたことで燃焼効率が向上し、インジェクターポートをコニカル形状にしたことで平均後退速度が1.1倍になった。

パラフィン燃料では、従来の燃焼方式を用いた場合の平均後退速度に比べ、多断面对向噴射方式 (Opposing Type) を用いた場合は約2倍高い値が得られ、多断面旋回流方式 (Swirling Type A) では約4倍高い値が得られた。また、Swirling Type Bでは酸化剤流入断面数が減ったにもかかわらず Swirling Type Aと同程度の平均後退速度が得られたので、グレインの大型化を行う際には Swirling Type Bの形状の方がコスト的に有効だと考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) Aviation Week and Space Technology, 9 Aug. 2004.
- 2) 麻生茂, 平田吉秀, 大山翔, 谷泰寛, “多断面旋回流方式を用いたハイブリッドロケットエンジンに関する研究”, 平成23年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2011-048.
- 3) Changjin Lee, Yang Na, Jae-Woo Lee, Yung-Hwan Byun, “Effect of induced swirl flow on regression rate of hybrid rocket fuel by helical grain configuration”, Aerospace Science and Technology, 11 (2007) 68-76.
- 4) 湯浅三郎, 坂本正文, 中村奨太, 瀬崎千夏, 桜井毅司, 白石紀子, “酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットエンジンの  $C^*$  効率の評価について”, 第53回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2009-4216.
- 5) Y. Hirata, S. Aso, T. Hayashida, R. Nakawatase, Y. Tani, K. Morishita, T. Shimada, Improvement of Regression Rate and Combustion Efficiency of High Density Polyethylene Fuel and Paraffin Fuel of Hybrid Rockets with Multi-Section Swirl Injection Method, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2011-5907, 2011.
- 6) Arif Karabeyoglu, Greg Zilliac, Brian J. Cantwell, Shane DeZilwa, Paul Castellucci, “Scale-Up Tests of High Regression Rate Paraffin-Based Hybrid Rocket Fuels”, Journal of Propulsion and Power Vol. 20 No. 6, 2004.