

## 低損耗・低コストノズルの開発

### Development of the low erosion and low-cost nozzle

田原鴻一・諸星宏樹・鎮目夢玄・寺田俊樹・高野敦・船見祐揮  
Koichi Tahara, Hiroki Morohoshi, Mugen Shizume, Tosihki Terada,  
Atsushi takano and Hunami Yuki

#### 1. 緒言

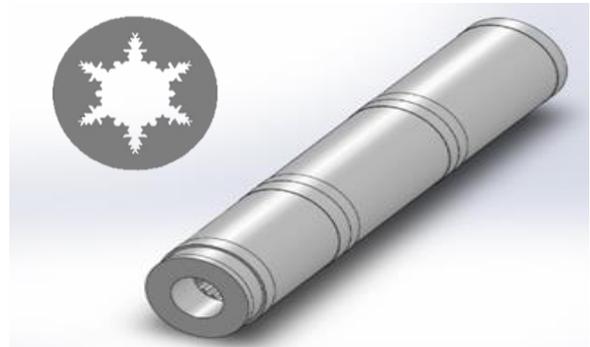
近年、大学や企業で研究・製作が盛んに行われている超小型衛星を、当研究室では安価で短時間で打ち上げるためにハイブリッドロケットの開発・製作に取り組んでいる。その中で、当研究室が昨年(2016年)度開発したベークライト製ノズルは第1図に示すように燃焼中に損耗して推力係数が低下し、ロケットのトータルインパルスや比推力を低下させてしまっていた。燃焼に耐え、かつ低コスト材料を選定し、より高性能なノズルの開発に取り組んだ。



第1図 ベークライト製ノズル(左: 燃焼前 右: 燃焼)

#### 2. ハイブリッドロケットエンジン

ハイブリッドロケットとは2種類の推進剤からなるロケットエンジンシステムである。現在、当研究室が使用しているハイブリッドロケットエンジンは液体燃料として亜酸化窒素、固体燃料としてABS樹脂を用いている<sup>1)</sup>。本研究で使用するハイブリッドロケットエンジンは昨年(2016年)度開発したもので、性能としては、推力1kN級で燃焼時間は約10秒である。使用する固体燃料は第2図に示す星型ストレートグレイン<sup>2)</sup>とした。



第2図 星型ストレートグレイン

#### 3. 低損耗・低コストノズル材料の選定

低損耗・低コストノズル材料の選定を行い、その候補を第1表にまとめた。

文献<sup>3)</sup>によれば、ノズル材料としてグラファイトやSiCが用いられ、その場合は損耗がゼロになるという結果が出ている。世界最強磁器<sup>4)</sup>は近年開発された有田焼の一種で、SiCに次ぐ強度、耐熱性を持ち、コストも低いため第一候補とした。しかし、熱衝撃に弱いという欠点があったが、ベークライト製のハウジングでノズルの外側を覆うことによって温度勾配を緩和することで燃焼環境の改善を試みた。

アルミニウム合金(A7075)は他材料と比較して軽量で低コストであったが、耐熱温度が低いためSiCと同等の耐熱温度を誇るSiO<sub>2</sub>を主成分とした耐熱塗料(セラコート36)を塗装して燃焼試験を行なうこととした。

グラファイトと CFRP はノズル材料として一般的に使用されているため、新規性はないが、当研究室のエンジンでも使用可能か確認するため燃焼試験を行なうこととした。また、CFRP に関しては当研究室で内作が可能というメリットも有していた。

SKD11 は、密度は高いが損耗が少ないという情報があったため、打ち上げ用ではなく、燃焼試験で繰り返し利用することを想定して作成することとした。

第1表 ノズル材料検

材料	価格 [円]	耐熱温度 [°C]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	曲げ強度 [MPa]	引張強さ [MPa]	
ベークライト紙系	2,770	120	1.4	-	82	
世界最強磁器(有田焼)	1,500 (食器の場合)	1000 以上で 軟化変形	3.9	350	-	
A7075	1,620	630	2.8	-	570	
耐熱塗料(セラコート36)	4,200	1400	1.8 (液体)	-	-	
グラファイト	5,814	2000	1.7 ~1.9	-	20~74	
CFRP	10,000	100	1.5	-	繊維	1750
					直交	39.4
SKD11	3,735	1080	7.8	-	950	
SiC	16,700 (10×10×1平板)	1400	3.1	410	-	

#### 4. 推力 1kN 級エンジン用ノズルの開発

2016 年度のノズルを参考に 2016 年度開発エンジン用の新たなノズルを設計した。スロート径などの主な寸法値は昨年度と同様とした。変更点はノズルの内部形状をコンカル型から、より効率良く推力を得られるベル型に変えた点と、エンジン(モーターケース)への取り付け方を変えた点である。昨年度のノズルは、ノズルの外側に直接ねじを切り、モーターケースに接続していたが、今年度に使用する有田焼のような材料にはねじ加工が困難であった。そのため、新たにベークライト製のハウジングを採用した。このハウジング内にノズルを接着し、ハウジングの外側にねじを切ることで、ノズルをモーターケースに取り付けることとした。また、ハウジングとノズルの側面の接触面にテーパをかけることでノズルにかかる応力を分散させ、ノズルの負担を軽減する役割も持たせた。開発したノ

ズルとハウジングの組み立て後の様子を第 3 図に示す。



第 3 図 2017 年度開発ノズル(世界最強磁器製)  
左：上流側 右：下流側

このノズル形状で、燃焼中にノズルに作用する内圧によって破壊が起きないことは応力計算から確認したが、計算に用いた材料強度は常温でのデータのため、実際に燃焼試験を行ってノズルの性能評価を行うこととした。

また製作は、世界最強磁器製ノズルは窯元<sup>5)</sup>に依頼し、アルミニウム合金製ノズル、グラファイト製ノズル、SKD11 製ノズルは学内の NC 旋盤で加工した。アルミニウム合金製ノズルはその後、耐熱塗装を施した。CFRP 製ノズルは金型を作成し、プリプレグ(炭素繊維に樹脂が含浸しているシート)を巻き付け、加熱硬化させることで作成した。第 4 図に金型にプリプレグを巻き付ける作業の様子を示す。



第 4 図 金型にプリプレグを巻き付けている様子

#### 5. 評価方法

ノズルの性能は、燃焼試験により得られた推力、トータルインパルス、比推力、損耗量を比較して各材料で作成したノズルを評価する。

損耗については燃焼試験後に、ピンゲージでスロート部の損耗の有無を確認し、損耗が確認された場合はノギスでスロート部の直径を測定する。また、燃焼後のスロート径と燃焼前のスロート径より損耗率を以下のように定義した。

$$(\text{損耗率}) = \frac{(\text{燃焼後スロート径}) - (\text{燃焼前スロート径})}{(\text{燃焼前スロート径})}$$

また破損がなかった SKD11 製ノズルとグラファイト製ノズルは推力と燃焼室内圧力の実測値から推力係数を算出し、損耗量によってどのように推力係数が変化するか調査した。

## 6. 燃焼試験

第1表にある材料(ベークライトと SiC は除く)のノズルで燃焼試験を行い、得られたデータを第2表にまとめた。また、比較用に昨年度(2016年度)のベークライト製ノズルのデータも併せて記載した。

第2表 燃焼試験結果

使用材料	スロート径 [mm]		損耗率 [%]	トータル インパルス [N・s]	比推力 [s]
	前	後			
ベークライト	15.8	23.2	46.8	4693	161
世界最強磁器	16.2	26.5	63.3	4267	150
アルミ+耐熱塗料	15.8	-	-	3932	140
グラファイト	15.8	15.8	0.0	4685	160
SKD11	15.8	20.9	32.0	4596	164
CFRP	15.8	16.7	5.7	3455	117

第一候補の世界最強磁器製ノズルは第2表の通り、ベークライトより損耗率が20%近く高く、スカート部が第5図のように破損してしまった。損耗については材料が燃焼環境に耐えられなかった可能性が高く、破損に関しては内圧による応力に耐えられることを計算で確認していたことから、熱衝撃による破損であると考えられる。



第5図 燃焼後の世界最強磁器製ノズル

アルミニウム合金製ノズルは燃焼開始約2秒でノズルがハウジング内から完全に消失した。後に回収した破片(第6図)を調査した結果、耐熱塗料は剥がれており、アルミニウム合金の表面には溶けた痕跡があったため、耐熱塗料が燃焼環境に耐えられずに剥がれ落ち、その結果、アルミニウム合金製ノズルも燃焼環境に耐えられずに破損を起こした可能性が高い。



第6図 アルミニウム合金製ノズルの破

グラファイト製ノズルは損耗、破損ともに確認されなかった。そのため、その後も繰り返して使用したが現時点(8回使用)で損耗は確認されていない。昨年度のベークライト製ノズルと比較してトータルインパルスと比推力に大きな変化はなかったが、スロート部の損耗や破損はなかった。その結果、推力係数は約1.5と、燃焼初期から終盤にわたり安定した値を得られ、設計値1.46(燃焼初期のエンジン内圧およびスロート径で設計した値)に対して良い一致を示した。

SKD11製ノズルは、破損はなかったが損耗が発生したため、再利用は断念した。しかし、ベークライト製ノズルと比較し損耗率は約10%改善でき、ベークライト製ノズルにあったスカート部の損耗もSKD11ではなかった。また、損耗の仕方としては、第7図に示すように星型に損耗していた。損耗の形状がこのようになった原因としては使用した星型旋回グレインの形状が転写されたためと考えられる。

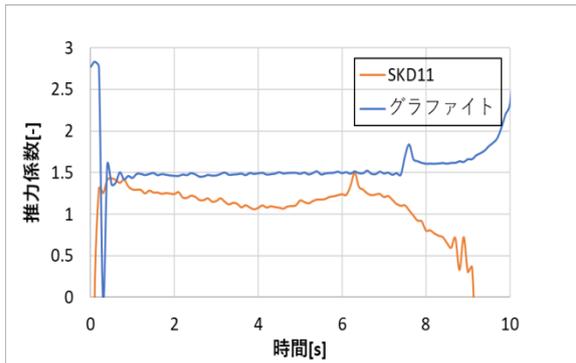


第7図 燃焼後のSKD11製ノズル

CFRP製ノズルは燃焼開始直後にハウジングから脱落し、一瞬しか火炎に当たらなかったが、脱落したノズルを回収して調査したところ、CFRPの樹脂は溶け、繊維がぼそぼその状態となっていた。また、5.7%の損耗率を測定することができた。

## 7. 推力係数

設計段階において、推力係数は燃焼初期の最大値が1.46となるように設計した。その後の燃焼試験で破損がなかったSKD11製ノズルとグラファイト製ノズルの推力実測値と燃焼室内圧力から得られた推力係数のグラフを図7に示す。なお、SKD11のスロート径は燃焼に伴い拡大しているが、第8図の推力係数の推力係数の計算においては、スロート径が時間に対して直線的に拡大していると仮定した。



第8図 推力係数の時間履歴

第8図にある通り、SKD11製ノズルとグラファイト製ノズルは燃焼初期で約1.5となり、設計値と良い一致を得た。また、SKD11製ノズルはスロート部が燃焼中に損耗したことにより、推力係数が徐々に減少しているのに対し、損耗がなかったグラファイト製ノズルは燃焼初期から終盤にかけて安定した値を得ることができた。

## 8. 結言

本研究で候補に挙げた材料の中で、最も損耗が少なかったのはグラファイトであった。このグラファイト製ノズルは再利用可能で高精度な試験を実施するのに有効であることも分かった。

燃焼試験での繰返し利用を想定して作成したSKD11製ノズルは1回の燃焼で損耗が発生してしまったが、損耗率は32.0%と昨年度のベークライト製ノズルと比較して10%以上の改善が見られた。

当初の第一候補であった世界最強磁器製ノズルは損耗が激しく、現状のままではノズル材料としては不適切であった。

その他の材料も破損やグラファイト製ノズル以上の損耗が発生したため、グラファイトが今回実験した材料の中で最もノズル材料として適している。また、今後燃焼時間が長くなるエンジンを開発する際は、燃焼終盤まで安定した推力係数を得られるグラファイトノズルを使用することでさらなる高高度化が見込まれる。

## 参考文献

- 1) 佐藤, 舘山, 米山, 軽量ハイブリッドロケットエンジンの開発, 神奈川大学卒業論文, 2017年
- 2) 鎮目, 諸星, 寺田, 田原, 高野, 船見 3Dプリンタによる星型フラクタル旋回形状グレイン搭載ハイブリッドロケットエンジンの開発, 宇宙輸送シンポジウム, 2018年
- 3) 山口, 川端, 平井, ケンプス, 脇田, 戸谷, 永田, ハイブリッドロケットにおけるノズルスロートエロージョン抑制材料に関する研究, 日本機械学会, 2016年
- 4) 佐賀県産業技術センターHP  
[http://arita-episode2.jp/ja/news/news\\_20161222.html](http://arita-episode2.jp/ja/news/news_20161222.html)
- 5) 株式会社匠, <http://www.takumikk.com/>