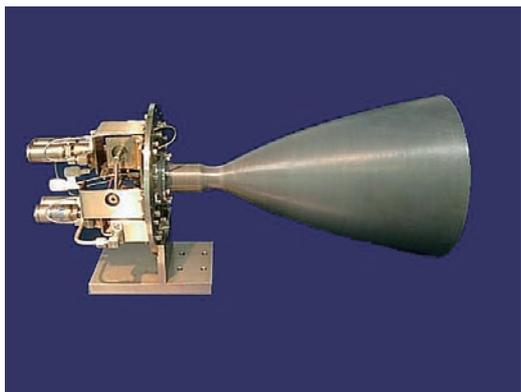


## 特集論文

金星探査機 (PLANET-C) 向け 500N  
セラミックスラスタの開発Development of 500N Ceramic Thruster for  
a Venus Explorer "PLANET-C"松尾 哲也\*<sup>1</sup>  
Tetsuya Matsuo森島 克成\*<sup>1</sup>  
Katsushige Morishima井上 涼平\*<sup>2</sup>  
Ryohei Inoue野中 吉紀\*<sup>3</sup>  
Yoshinori Nonaka

従来の人工衛星の軌道・姿勢制御用スラスタは、ニオブ系合金にシリコンコーティングした燃焼器を使用していた。しかし、耐熱性（耐熱温度 1 300 °C 程度）、寿命及び取扱性に問題があり、また輸入品であるため入手性にも問題があった。そこで、燃焼器を国産のセラミックス（耐熱温度 1 500 °C）とすることで、スラスタ性能向上、低コスト化、安定供給が期待できる。当社では、世界初のセラミックスラスタの実用化を目指し、認定試験を実施中であり、金星探査機（PLANET-C）搭載可能性のめどが得られつつある。本報では、認定試験の状況について報告するとともに、認定試験で使用している燃焼試験設備についても紹介する。

## 1. はじめに

スラスタは、人工衛星の軌道や姿勢を制御するために使用される小型のロケットエンジンである。現在の人工衛星などの宇宙機では、推薬を触媒分解して高温・高圧のガスを発生させて推力を得る一液スラスタと、燃料と酸化剤を混合し、燃焼ガスを噴射して推力を得る二液スラスタが使用される。

一方、人工衛星に搭載される機器は、軽量、高性能かつ信頼性が高いことが求められる。特に人工衛星の軌道・姿勢制御用スラスタでは、衛星の軽量化に大きく貢献することができるので、スラスタ性能が少しでも高いことが要望される。

二液スラスタは、一液スラスタと比較して高性能

であるが、2 000 °C を越える燃焼ガスに耐えるため、特殊な耐熱合金が必要となる。従来の二液スラスタでは、ニオブ系耐熱合金が使用されていたが、耐熱温度が 1 300 °C 程度であり、また耐酸化コーティングが必要であることから、性能・信頼性の面で大きな制約があった。そこで、耐熱温度 1 500 °C で高強度・高靱性の構造用セラミックスである窒化珪素系セラミックスを燃焼器材料として開発を進めてきた<sup>(1)(2)</sup>。

本報では、現在、PLANET-C 搭載に向け実施している認定試験の状況について報告するとともに、認定試験で使用している燃焼試験設備について紹介する。

## 2. セラミックスの特性

図 1 にスラスタの構成を示す。スラスタは推薬の供給を制御する推薬弁、推薬を燃焼器に供給し混合させる噴射器、推薬が燃焼する燃焼器、燃焼ガスを加速するノズルの 4 つの部分からなる。セラミックスラスタでは、燃焼器及びノズルに窒化珪素系モノリシックセラミックスを使用している。窒化珪素は、非氧化物系セラミックスの一種で、靱性が高く、1 500 °C 程度の耐熱性、高温強度、耐熱衝撃性に優れており、ガスタービン部品やエンジン部品として開発・使用されている。窒化珪素系モノリシックセラミックスの主要な物性値を表 1 に示す。従来の二液スラスタで使用されているニオブ合金の物性値と比較し、同等以上の性能を持つといえる。

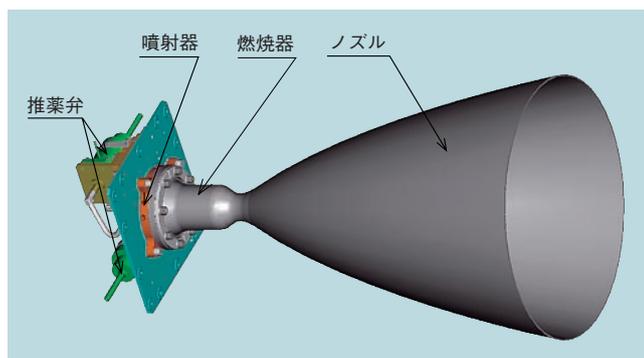


図 1 スラスタ構成  
スラスタの主要構成部品を示す。

\*<sup>1</sup> 長崎造船所特殊機械部宇宙機器設計課\*<sup>2</sup> 長崎造船所特殊機械部組立試験課\*<sup>3</sup> 技術本部長崎研究所強度研究室

表1 窒化珪素とニオブ合金 (C-103) の特性

	窒化珪素 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (SN282)	ニオブ合金 (C-103)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	3400	8870
曲げ強度 (常温) (MPa)	738	640
曲げ強度 (高温) (MPa)	468 (1500℃)	76 (1370℃)
熱伝導率 (W/m・K)	64.0	41.9
耐熱温度 (℃)	1500	1300
耐酸化コーティングの可否	不要	必要

### 3. 燃焼試験設備の概要

PLANET-C 向け 500N スラスタは、長秒時 (1 000 s) の燃焼試験が認定試験に含まれるが、従来の燃焼試験設備では真空ポンプ容量から約 10s までの燃焼試験しかできなかったため、長秒時燃焼試験が可能となるように、燃焼試験設備を整備した。試験設備の外観/イメージを図2に示す。整備した設備では、500N 級までのスラスタを、1 Torr 程度の背圧で長秒時燃焼させることができる。

以下に特徴を示す。

- ① 高真空状態 (1 Torr 程度の背圧) が可能
- ② 縦置き真空チャンバ (縦置き燃焼)

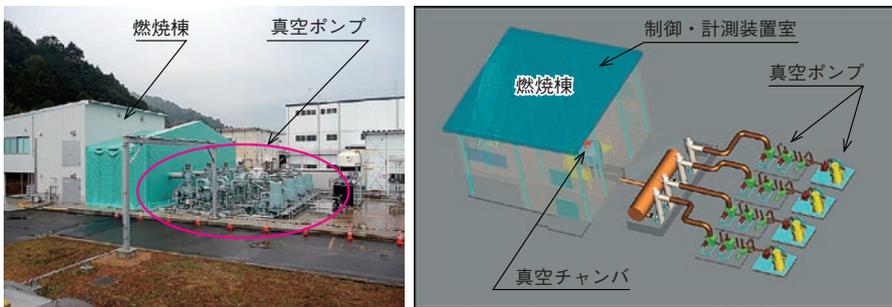


図2 燃焼試験設備  
外観とイメージを示す。



図3 真空ポンプ  
燃焼試験設備で使用している大容量真空ポンプの外観を示す。



図4 真空チャンバ  
燃焼試験設備で使用している真空チャンバの外観を示す。



図5 クリーンブース  
燃焼試験設備で使用しているクリーンブース (スラスタセッティング時に使用) の外観を示す。



図6 計測・制御システム  
燃焼試験設備で使用している計測・制御システムの外観を示す。

### ③ ランニングコスト低減

設備の主要な要素の写真を図3～図6に示す。以下、主要な要素について概要を述べる。

#### <真空ポンプ>

高空燃焼試験設備では、蒸気エジェクタを使用した真空装置を使用するのが一般的であるが、本装置は水封式真空ポンプを使用している。これにより、ランニングコストを大幅に低減することが可能となった。水封式真空ポンプに、3台のルーツポンプ (メカニカルブースタ) を1ユニットとして、4ユニットを設置している。

#### <真空チャンバ>

燃焼棟の1階にφ2mの真空チャンバが設置されている。従来の燃焼試験設備と異なり、重力の影響及びスラスタ内部にたまった未燃推薬の爆燃を考慮し、スラスタを縦置きで燃焼させるため、スラスタのアクセスは上面 (2階) から行う。組立時の清浄度を確保するために、スラスタのアクセス部分にはクリーンブースを設けている。アクセスフランジには小推力スラスタを4基同時にセットアップすることができ、燃焼試験のより一層の効率化が可能である。1階部分には、モニタ用の窓、温度計測用の赤外線透過窓、圧力センサ・熱電対などのアクセスポート、冷却水ポートなどが設けられている。

<制御・計測システム>

圧力、流量、温度、モニタ、サーモグラフィなどの計測・記録及びバルブ類の制御システムを、パソコンベースのシステムで構築している。圧力、温度などの計測は、計測・制御用のグラフィカルプログラミングソフトウェアであるlabviewで行い、圧力など72ch、温度26ch分を記録できる。これらの計測・制御システムは、光LANを介して遠隔操作及び遠隔監視が可能である。

4. 金星探査機 (PLANET-C) 向け 500N セラミックスラスタの認定試験状況

認定試験のフローを図7に示す。最初に推力調整試験を行う。推力調整試験では、規定の供給圧で要求推力を満足するように噴射器のオリフィスを調整後、燃焼試験にて要求性能を満足しているかを確認する。その後、打上げ時の振動環境から予想される加速度条件で機械環境試験を実施する。機械環境試験後にスラスタに異常がないかを確認するために、各要素の単体機能試験、気密試験を実施し、燃焼試験にてヘルスチェックを実施する。その後、想定される供給圧範囲で燃焼試験を行い、性能特性を確認後（作動範囲確認試験）、最後に、長秒時（1000s）燃焼を含んだ実際の運用サイクルでの燃焼試験を実施する。

現在、認定試験として、推力調整試験と機械環境試験を実施中であり、本報ではその結果について報告する。

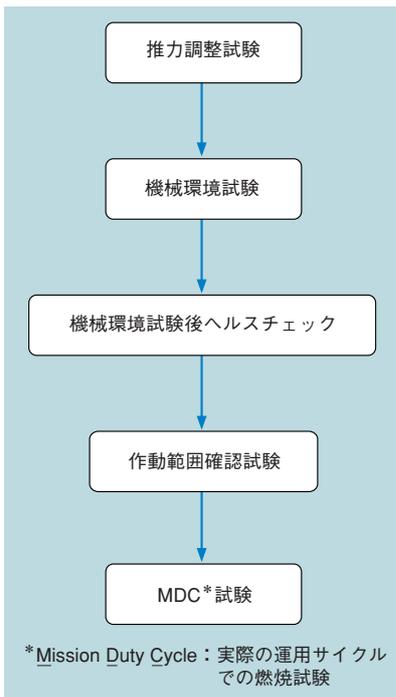


図7 認定試験フロー  
認定試験の試験内容を示す。

<推力調整試験>

前述の燃焼試験設備を用いて、推力調整試験を実施した。推力調整試験中の状況を図8に、試験結果を表2に示す。推力調整試験の結果、O/F（酸化剤と燃料の質量流量比）、推力、比推力とも規格を満足することを確認した。

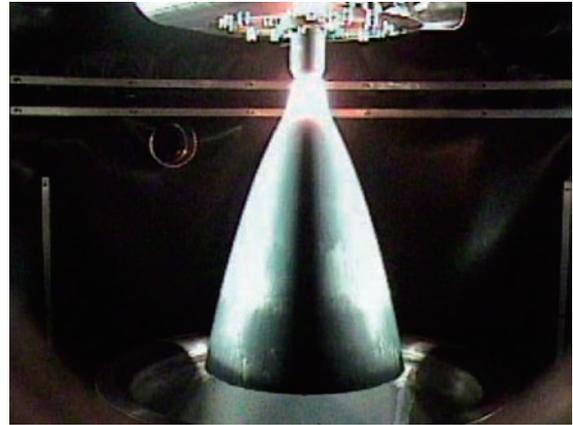


図8 推力調整試験状態  
真空チャンバ内にセットアップされた500Nセラミックスラスタの推力調整試験中の状態。

表2 推力調整試験結果

	計画(規格)値	試験結果
燃焼圧 (MPa)	0.69	0.69
O/F	0.80±0.01	0.80
推力 (N)	500±25	502
比推力 (s)	≥310	319

<機械環境試験>

打上げ時の振動環境から予想される加速度条件を荷した振動試験を実施した。表3に加振条件を、図9にセットアップ状態を示す。ランダム振動試験、正弦波振動試験の結果、過大な応力発生は確認されておらず、供試体の損傷もなかった。また、破壊確率を評価した結果（表4）、要求値に対して破壊確率が十分小さく、PLANET-C搭載向けのスラスタは打上げ時の振動環境に十分耐え得る強度を有することが確認できた。

5. 今後の計画

PLANET-C搭載向けのスラスタについては、長秒時（1000s）燃焼試験を含めた実際の運用条件での試験を含め、継続して認定試験を実施する。その後、実際のフライトに供試するFM品についても、燃焼試験、機械環境試験を実施する予定である。

さらにこれまでの試験結果で、燃焼器温度に余裕があることがわかっているため、更なるスラスタ性能向上を図る予定である。

表3 機械環境試験条件

(a) ランダム振動

印加時間	水平方向		垂直方向	
	80s		80s	
加振レベル	周波数 (Hz)	PSD (G <sup>2</sup> /Hz)	周波数 (Hz)	PSD (G <sup>2</sup> /Hz)
	20	0.004	20	0.0150
	40	0.020	30	0.0200
	160	0.020	40	10.0000
	250	0.400	55	10.0000
	370	0.400	60	0.0500
	430	2.000	90	0.0800
	520	2.000	1000	0.0800
	730	0.080	2000	0.0800
	1900	0.080		
	2000	0.050		
22.8 Grms		17.0 Grms		

(b) 正弦波振動

加振方法	水平方向		垂直方向	
	2 Oct/min	1往復掃引	2 Oct/min	1往復掃引
加振レベル	周波数 (Hz)	加速度 (G)	周波数 (Hz)	加速度 (G)
	5	0.55	20	0.55
	18	12.0	30	25.0
	100	12.0	40	25.0

(注) PSD : Power Spectrum Density, パワースペクトル密度

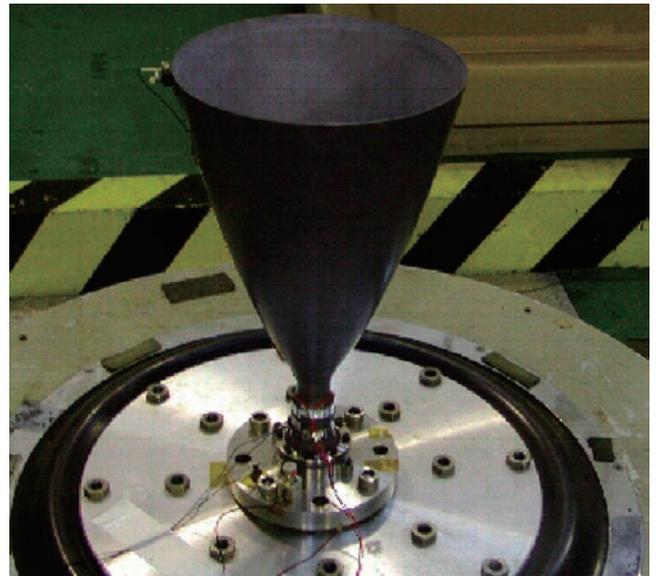


図9 機械環境試験セットアップ状態  
加振機上に固定された500Nセラミックスラスタ

表4 破壊確率の評価

	要求値	解析	試験
ランダム	$\leq 2.9 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-11}$	$5.6 \times 10^{-13}$
正弦波	$\leq 2.9 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-21}$	$5.1 \times 10^{-16}$

## 6. ま と め

高強度・高靱性が特徴である窒化珪素セラミックスを使用した500N二液スラスタの金星探査機(PLANET-C)搭載性を確認するため、認定試験を実施中であり、セラミックスラスタが金星探査機(PLANET-C)に十分搭載できるめどが得られつつある。

今後は、継続して認定試験を実施する。その後、実際のフライトに供試するFM (Flight Model) 品が要求仕様を満足し、納入できるかどうかを確認するため、AT (Acceptance Test, 受入試験) を実施する予定である。さらに、将来的にはスラスタ性能の向上を図る予定である。

終わりに、セラミックスラスタの開発全般にわたり、多くのご指導を受けた(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の上杉名誉教授、佐藤教授、澤井准教授を初めとする関係各位、及び基礎データの提供、製造に関するご支援を頂いた京セラ(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 野中吉紀ほか, 衛星用セラミックスラスタ-セラミックス部材の高信頼性設計, まてりあ, 第44巻第7号 (2005) p.565 ~ 570
- (2) 三島弘行ほか, 人工衛星軌道姿勢制御用セラミックスラスタの開発, 三菱重工技報, 第42巻第5号 (2005) p.250 ~ 253



松尾哲也



森島克成



井上涼平



野中吉紀