

人工衛星軌道姿勢制御用セラミック スラスタの開発

Development of Ceramic Thruster for Space Propulsion System

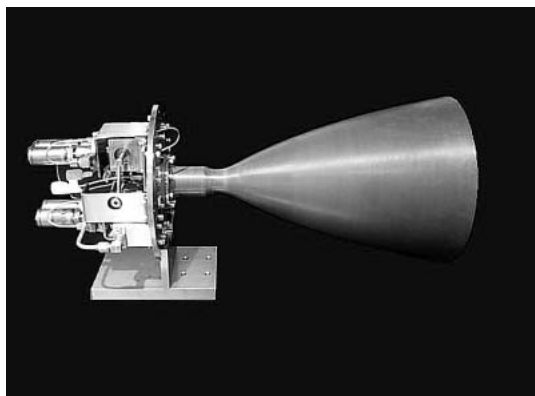
三島 弘 行^{*1}
Hiroyuki Mishima

森 島 克 成^{*1}
Katsushige Morishima

野 中 吉 紀^{*2}
Yoshinori Nonaka

西 野 宏^{*3}
Hiroshi Nishino

澤 井 秀 次 郎^{*4}
Shujiro Sawai



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においては、スラスタ性能を向上させることで、衛星の軽量化に大きく貢献することができる。そこで、従来使用していたニオブ系耐熱合金（耐熱温度 1 300 ℃程度）を、より高性能な窒化珪素セラミックス（耐熱温度 1 500 ℃）に変更することで、スラスタ性能の向上を図った。試作したスラスタで、実用性を評価するために実施した燃焼試験、振動試験等の結果を報告する。

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。現在の人工衛星等の宇宙機では、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 ℃を越える燃焼ガスに耐える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 ℃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、耐熱温度のポテンシャルが大きいセラミック系材料に注目し、数種類のセラミックスについて検討した結果、耐熱温度 1 500 ℃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が燃焼器材料として有望であることが分かった。

本報では、セラミックスラスタに不可欠な技術と、試作した20N及び500N二液スラスタの燃焼試験、振動試験等の結果について報告する。

2. セラミックスラスタの概要

2. 1 スラスタの概要

図1に20N二液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、推薬を混合・燃焼させる噴射器、推薬が燃焼する燃焼器の3つの部分からなる。

二液スラスタでは、自着火性を持ち常温で長期保存が可能であることから、燃料としてヒドラジン (N_2H_4) あるいはモノメチルヒドラジン ($\text{N}_2\text{H}_3\text{CH}_3$) を、酸化剤として四酸化二窒素 (N_2O_4) が使用される。この組み合わせでの燃焼ガスの温度は2 000 ℃を越えるので、燃焼器は耐熱性が高いことが求められる。従来のスラスタでは、耐熱温度約1 300 ℃のニオブ合金 (C-103) が使用されてきた。ニオブ合金は、融点が2 350 ℃と高く高温での強度低下が少ないという長所を持つが、酸化に弱いため、耐酸化コーティングが必要であった。このコーティングの耐熱性が材料の寿命を制限し、性能・信頼性の面で大きな制約があるだけ

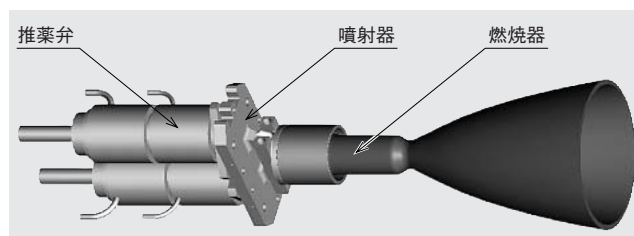


図1 スラスタ構成 スラスタのイメージと主要構成部品を示す。

^{*1} 長崎造船所特殊機械部宇宙機器設計課

^{*2} 技術本部長崎研究所強度研究室

^{*3} 技術本部長崎研究所振動研究室主席 工博

^{*4} (独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部助教授 工博

でなく、製造の面でも工程が複雑化するなど不利な面があった。

2. 2 窒化珪素セラミックスの特性

燃焼器材料に対する厳しい耐熱性を満たす材料として、耐熱温度のポテンシャルが大きいセラミック系材料に注目し、数種類のセラミックスについて検討を行った。その結果、耐熱温度はセラミックス系材料のなかではそれほど高くはないが、強度・靱性が高い窒化珪素（京セラ（株）製 SN282）を燃焼器材料として選定した。主要な物性について、従来使用してきたニオブ系合金（C-103）と比較した結果を表 1 に示す。スラスタの燃焼器材料としてみた場合、高い耐熱温度と高温での強度低下が小さい窒化珪素は非常に優れているといえる。また、大きな熱伝導率は、熱衝撃に対する耐性が強い材料であることを示している。このように窒化珪素は、ニオブ合金と同等以上の性能を持つことが分かる。

3. セラミックスラスタの設計・製造技術

3. 1 強度設計

セラミックスのような脆性材料は、強度の体積依存性（大型の部品ほど低強度になる）等の特徴的な性質を持つので、金属などの延性材料と違い破壊確率を考慮した強度設計が必要となる。

表 1 窒化珪素とニオブ合金（C-103）の特性

	窒化珪素 Si ₃ N ₄ (SN 282)	ニオブ合金 (C-103)
密度 (kg/m ³)	3 400	8 870
曲げ強度 (常温) (MPa)	634	640
曲げ強度 (高温) (MPa)	366 (1 500℃)	76 (1 370℃)
熱伝導率 (W/m・K)	64.0	41.9
耐熱温度 (℃)	1 500	1 300
コーティングの有無	不 要	必 要

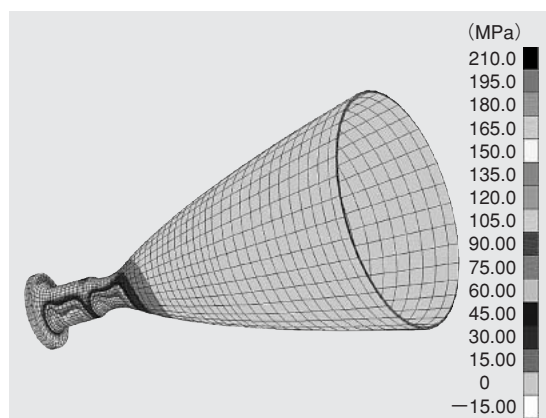


図 2 打上げ環境における強度解析結果 打上げ時の振動による応力分布を示す。

セラミックスラスタの設計にあたって、打上げ時の振動荷重と燃焼時の熱応力に対して、ワイブル統計に基づく強度評価を行った⁽⁴⁾。

打上げ時の振動環境から予想される加速度条件を負荷した場合の三次元応力解析結果を図 2 に示す。燃焼器付根とスロート部分に、高い曲げ応力が発生しているが、形状を工夫することで発生応力を 200 MPa 程度に抑え、破壊確率は十分低く保たれている。

120秒間の連続燃焼時の応力の時間履歴計算結果を図 3 に示す。熱応力は燃焼時間とともに増加し、燃焼開始後 120秒時に最大となるが、当初懸念されていた熱衝撃は、窒化珪素の高い熱伝導率により生じないことが分かった。

3. 2 接合技術

セラミックスと金属を接合するには、ファスナによって機械的に結合する方法が一般的であるが、セラミックス材料に穴を開けることは強度上望ましくなく、またフランジをつけると質量が増加することになる。

そこで、窒化珪素セラミックスと線膨張率が近いニオブ合金とのろう付け試験を実施した。ろう付け試験片を図 4 に示す。高温での強度試験の結果、約 750℃までろう付け強度が保持できることが確認できた。この接合手法は、軽量化の要求が厳しい 20N 二液スラスタの燃焼器（SN282 製）とインジェクタ（チタン合金製）間の接合に適用した。

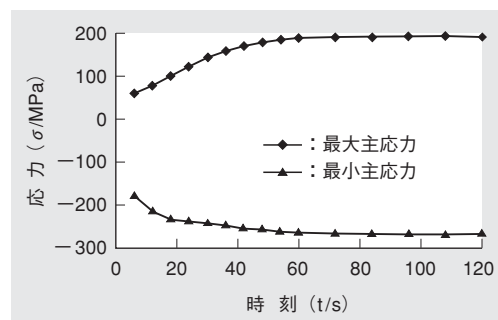


図 3 燃焼時の強度解析結果 120秒燃焼における応力の時間履歴を示す。

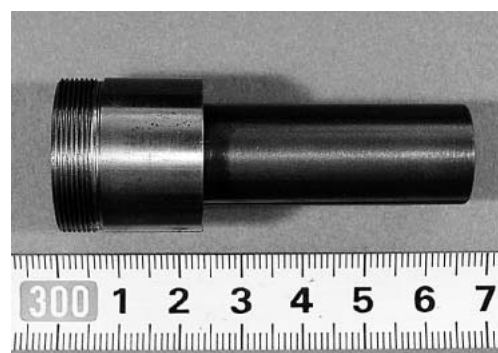


図 4 ろう付け試験片 セラミックス(SN282)とニオブ合金のろう付け状況を示す。



図5 20N二液スラスタ燃焼器 全長約130 mm，最大径60 mm.

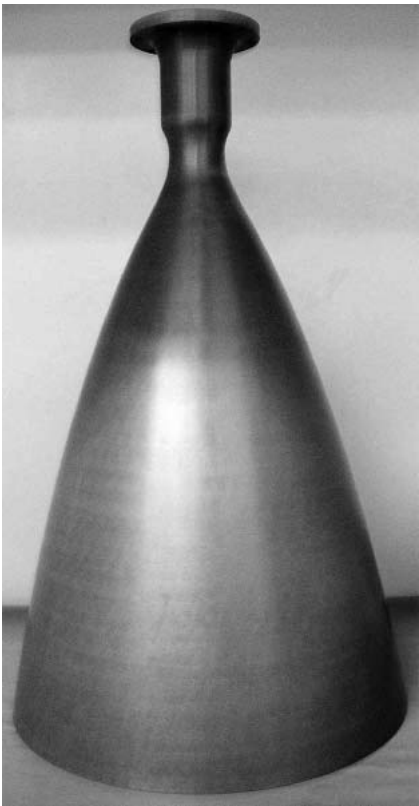


図6 500N二液スラスタ燃焼器 全長約465 mm，最大径280 mm の世界最大級のセラミックス部品.

3. 3 試作スラスタ

試作した20N二液スラスタの燃焼器を図5に，500N二液スラスタの燃焼器を図6に示す。
500N二液スラスタの燃焼器は，長さ約465 mm，出口直径280 mmとセラミックス部品としては世界最大級のサイズである。

4. 実 証 試 験

4. 1 燃 焼 試 験

燃焼試験は，宇宙空間での使用を模擬し低圧チャンパ内で実施した．図7にチャンパ内にセットしたスラスタを，図8に燃焼中の20N二液スラスタを示す．図8の右下の図はサーモグラフィ装置による燃焼中の



図7 燃焼試験セットアップ状況 低圧チャンパ室内にセットアップされた500Nセラミックススラスタ．

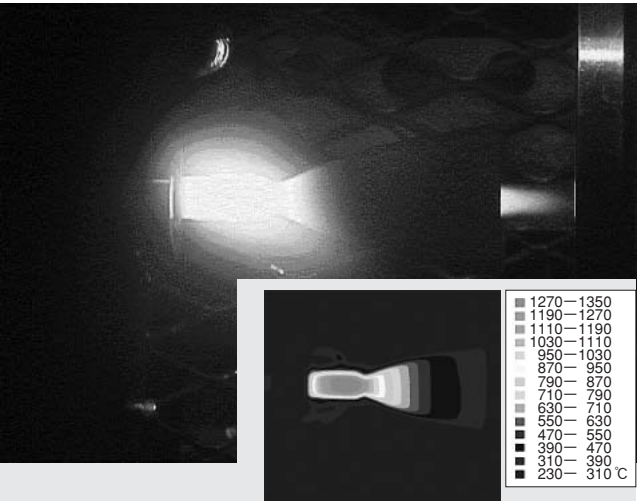


図8 燃焼中の20N二液スラスタ 図の右下はサーモグラフィ装置による温度計測結果．

表2 燃焼試験結果
(500Nセラミックススラスタ)

	計画値	試験結果
燃焼圧 (MPa)	0.70	0.72
O/F	0.80	0.78
推力※1 (N)	500	533
比推力※1 (s)	310	319
燃焼器温度 (℃)	1 250	1 180

※1：開口比150と仮定した値

温度計測結果である。
500N二液スラスタのスラスタ性能値を表2に示す．予定された性能を十分に発揮していることが確認できた．また，燃焼器温度がセラミックスの耐熱温度1 500℃に対して300℃程度余裕があることから，性能向上の余地があることが分かった。

4. 2 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負荷した振動試験を実施した．表3にランダム振動の加振条件を，図9に振動試験の実施状況を示す．縦軸方向及び横軸方向のランダム振動試験，低周波衝撃試験

表3 ランダム振動試験条件

	水 平 方 向		垂 直 方 向	
印加時間	45 s		45 s	
加振 レベル	周波数 (Hz)	PSD (G ² /Hz)	周波数 (Hz)	PSD (G ² /Hz)
	20	0.040	20	0.180
	40	0.010	48	0.180
	120	0.010	70	0.810
	300	0.114	80	0.810
	360	0.114	160	0.051
	600	0.029	1 250	0.051
	2 000	0.029	2 000	0.020
	8.51 Grms		11.02 Grms	

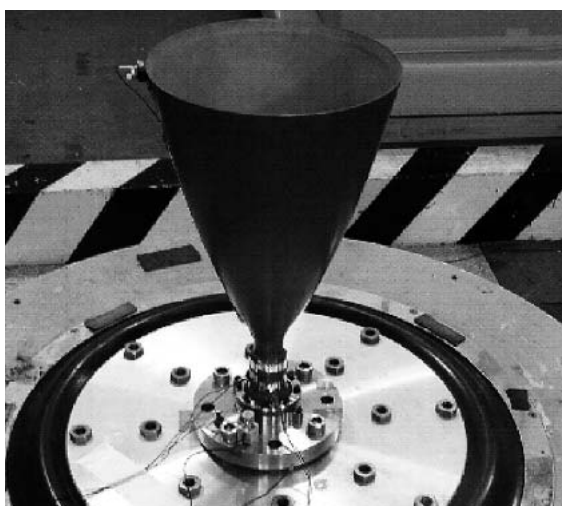


図9 振動試験セットアップ状態 加振機上に固定された500Nセラミックスラスタ。

を実施した結果、ほぼ予想通りの応力発生であり、供試体の損傷等もなく、強度的に問題ないことが確認された。

4.3 耐衝撃性試験

宇宙空間で使用する場合、スペースデブリの衝突を無視することはできない。特にセラミックスのような脆性材料においては、スペースデブリとの衝突による衝撃で、構造体全体が破壊しないことを確認する必要がある。

そこで、ノズル先端部の厚さを模擬した試験片に直径0.3 mmのガラス粒を4.0 km/sで衝突させる実験を実施した。これは、惑星間空間で宇宙機に衝突する可能性がある速度約20 km/s、直径0.1 mmのメテオロイドとの衝突をエネルギー的に模擬した条件である。図10に示すように衝突によってクレータが発生するが、試験片自体は破壊せず、スペースデブリ衝突に対して一定の強度を持つことが確認できた。

5. 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



図10 耐衝撃性試験片 直径0.3mmのガラス球衝突後のクレータを示す。

を使用した二液スラスタを試作し、燃焼試験、振動試験等を実施し、セラミックスラスタが実用化に十分な性能を持つことが確認できた。

今後、燃焼器温度に余裕があることが燃焼試験の結果判明したので、インジェクタの最適化を行いスラスタ性能の向上を図るとともに、実機搭載に向けた品質確認試験を実施する予定である。

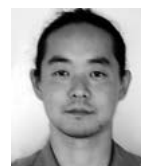
終わりに、セラミックスラスタの開発全般にわたり、多くのご指導を受けた(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の上杉教授、佐藤助教授を初めとする関係各位、及び基礎データの提供、製造に関するご支援を頂いた京セラ(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

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
- (2) Sawai, Shujiro et al., Development of Ceramic Based 500 N Class Bipropellant Thruster, 56th IAC, IAC-05-C4.3.01 (2005)



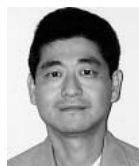
三島弘行



森島克成



野中吉紀



西野宏



澤井秀次郎