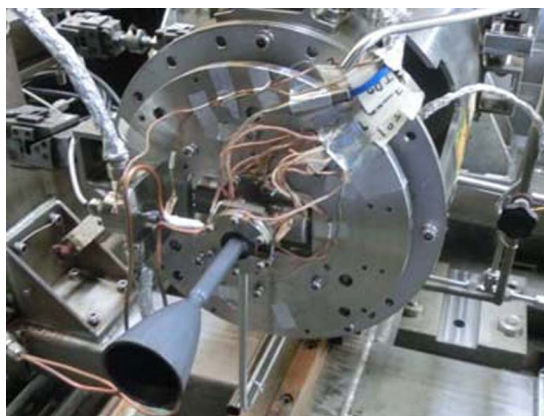


# 衛星長寿命化に貢献！世界最高性能・小推力スラスタの開発

## Development of High-performance Small Thruster



田中 伸彦\*<sup>1</sup>  
Nobuhiko Tanaka

白岩 大次郎\*<sup>2</sup>  
Daijiro Shiraiwa

金子 敬郎\*<sup>3</sup>  
Takao Kaneko

古川 克己\*<sup>4</sup>  
Katsumi Furukawa

小推力スラスタは、人工衛星の姿勢制御や軌道制御に使用される推力1～20N級の小型の液体ロケットエンジンである。近年、人工衛星の長寿命化に伴い、推薬消費量と運用性の改善が強く求められている。当社では、耐熱性が高い窒化珪素系セラミックスを燃焼器に適用することで、スラスタ性能の向上を図り、次世代の商用衛星向けに10N二液スラスタの開発を進めており、実機型スラスタの燃焼試験で従来のスラスタを凌駕する高性能を達成する目途が得られた。本稿では、開発中の小推力スラスタ概要と試験結果を報告し、今後の開発計画について紹介する。

## 1. はじめに

近年、経済的な効率性の観点から、通信衛星などの静止衛星は運用期間が10年を越えるものが多くなっている。衛星の運用寿命は、“電力系機器の耐用年数”や“軌道を維持するために使用できる推薬量”で決まる。後者については、衛星の大型化による搭載推薬量の増加とともに高性能スラスタの使用で消費推薬量を減らすアプローチが採られる。

また、静止軌道上に配置される衛星数を増やすために、衛星の姿勢や位置(軌道)の制御精度が厳しくなっていることから、従来、姿勢制御用に使われてきた20N級スラスタより、微細な制御が可能な10N級スラスタのニーズが高まっている。

そこで当社では、“高性能”でかつ“低コスト”に加えて、“運用性を向上”させることで、ロバスト性の高い推進系を実現する10N二液スラスタの開発を進めており、地上試験モデルを使用した燃焼試験で、他社同等スラスタを越える比推力を達成し、10N二液スラスタの実用化にむけて、技術的な目途を得ることができた。本稿では、開発中の10N二液スラスタの概要と開発成果について報告し、今後の開発計画について紹介する。

## 2. 小推力スラスタ概要

### 2.1 スラスタ構成

スラスタは、推薬の触媒分解や燃焼により、高温・高圧のガスを発生させて推力を得る化学推進スラスタや、推薬をイオン化し、静電的あるいは電磁的に加速することで推力を得る電気推進スラスタがあるが、現在の人工衛星の推進系には、化学推進スラスタが多く使用される。当社で開発中の10N二液スラスタは、燃焼反応を利用するスラスタであり、燃料と酸化剤の二種類の推薬を使用することから二液スラスタと呼ばれる。

\*1 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部宇宙機器技術部 工博

\*2 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部宇宙機器技術部

\*3 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部宇宙機器技術部 課長

\*4 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部宇宙機器技術部 首席技師

二液スラスタの構成を図1に示す。スラスタは推薬の供給を制御する推薬弁、推薬を噴射・混合させる噴射器、噴射した推薬の燃焼と発生したガスを加速する燃焼器の3つの部品で構成される。

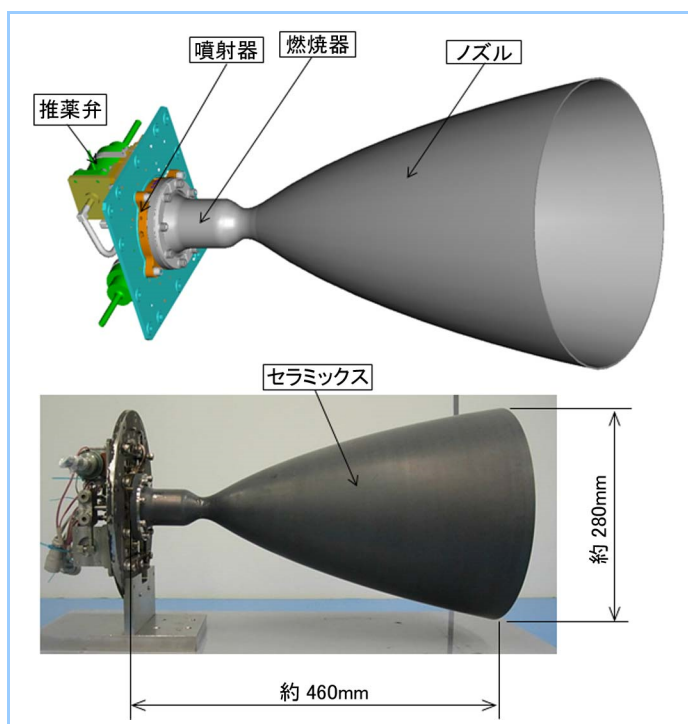


図1 500N セラミックスラスタ

当社の二液スラスタでは、高温となる燃焼器に窒化珪素系モノシリックセラミックスの一体成形部品を使用していることを特徴としており、2001年から、金星探査機あかつきの軌道変換用エンジン向けの500N二液スラスタを開発し<sup>(1)(2)</sup>、2010年6月に世界で初めてセラミックスラスタの宇宙空間での作動に成功した。金星探査機あかつき搭載の500N二液スラスタの写真を図2に示す。なお、本スラスタに使用されているセラミックス製の燃焼器は、長さ約460mm、出口直径約280mmとモノシリックセラミックス部品としては世界最大級のサイズである。

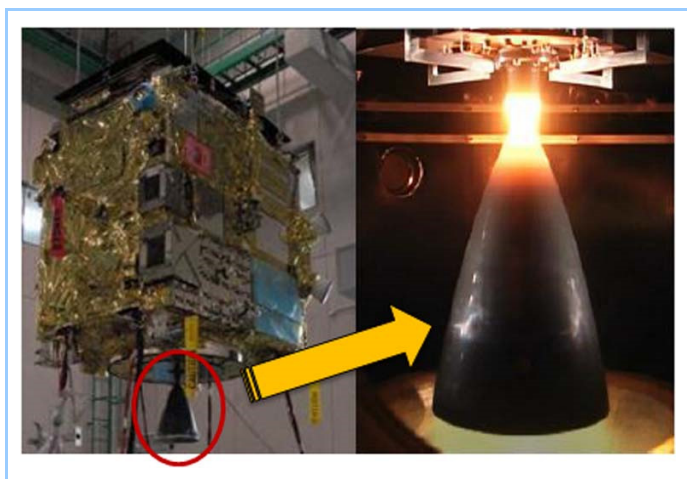


図2 あかつき搭載時の500N セラミックスラスタ

## 2.2 窒化珪素セラミックスの特性

二液スラスタの燃焼ガス温度は2000℃を越えるため、従来はニオブ系耐熱合金を使用していた。ニオブ系耐熱合金は、高温での酸化耐性が低く、耐酸化コーティングが必要であり、推薬の一部を燃焼器壁面に沿って流すことで壁面を冷却するフィルムクーリングを行っても、実用的な耐熱温度は1300℃程度に制限される。このため、性能、コスト及び信頼性の面で大きな制約があ

り、スラスト改善に対するネックとなっていた。そこで、表1に示す数種類のセラミックス及び貴金属についてトレードオフした結果、耐熱温度は 1500℃と低めであり、フィルムクーリングは必要であるが、コーティングを必要としない、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選定した。

表1 燃焼器材料トレードオフ一覧

	ニオブ合金	窒化珪素	C/C コンポジット	CMC (炭化珪素)	Pt/Rh	Ir/Re
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	8870	3400	1500	約 3000	19800	Ir:22 650 Re:21 020
曲げ強度 @1200℃ [MPa]	150	600	140	350	120	520
強度の ばらつき	○	△	△	×	○	○
熱伝導率 [W/mK]	42	52	35	60	Pt:72 Rh:150	Ir:147 Re:48
耐酸化性	×	○	×	×	○	×
	(コーティング必要)	(コーティング不要)	(コーティング必要)	(コーティング必要)		(Irコーティング必要)
気密性	○	○	×	×	○	○
コスト	高	低	高	低	高	高

窒化珪素は、非酸化物系セラミックスの一種であり、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。他のセラミックス系材料、例えば炭化珪素と比較すると耐熱温度は低いが、耐酸化性と靱性が高く、強度のばらつきが小さいという特徴を持つ。このため、比較的大型の構造部材にも使用可能であり、高温強度も 468MPa@1500℃であり、従来の二液スラストで使用されているニオブ合金の 76MPa@1370℃に対して、十分な強度であるといえる。

また、コストの面では、耐熱温度が高い貴金属(イリジウム系、白金系等)を燃焼器に採用したスラストもあるが、窒化珪素系セラミックスは貴金属よりは安価であり、素材から国産であるため、納期も海外調達であるニオブ合金と比較して短く、安定供給の面でも優位性がある。

### 2.3 10N 二液スラストの要求性能(開発目標)

10N 二液スラストの要求性能を表2に示す<sup>(3)(4)</sup>。要求性能は、衛星システムメーカーのヒアリング及び既存スラストのベンチマークにより設定された。市場に供給されている他社製品は、比推力 290 秒が最高であるのに対して、比推力 300 秒を目標とした。約 10s の比推力向上は、概算で、静止衛星の運用を1~2年延ばすことができる推薬量に相当し、衛星オペレータに多大なメリットがある。連続燃焼時間が4時間については、10N 二液スラストを長時間噴射することで、軌道変換に用いる 500N 二液スラストのバックアップになり得るための要求性能である。また連続噴射では、ブローダウン運用要求から供給圧の作動範囲が設定されている。

表2 要求性能

No.	項目	開発目標
1	ノミナル推力(N)	10
2	推薬	MMH/MON-3
3	混合比 O/F	1.0~2.1(ノミナル:1.6)
4	供給圧 Pv(MPa)	0.69~2.76(ノミナル:1.52)
5	連続比推力(s)	295(目標 300)
6	パルス比推力(s)	250(Duty50%)かつ他社製と同等以上
7	連続噴射時間(h)	4以上
8	累積噴射時間(h)	15以上(目標 30)
9	総パルス	1000000 以上
10	噴射パターン	制約がないこと
11	再着火回数	700 回以上

### 3. 10N 二液スラスタの開発

#### 3.1 地上試験用スラスタ

地上試験用に製作したスラスタの外観図を図3に示す。本スラスタの燃焼器は、窒化珪素系セラミックスであり、噴射器との接合はフランジ接合とし、金属製Cシールで気密を保持する構造とした。また、噴射器には、推薬凍結を防止するためのヒータ及び温度センサが取り付けられる。

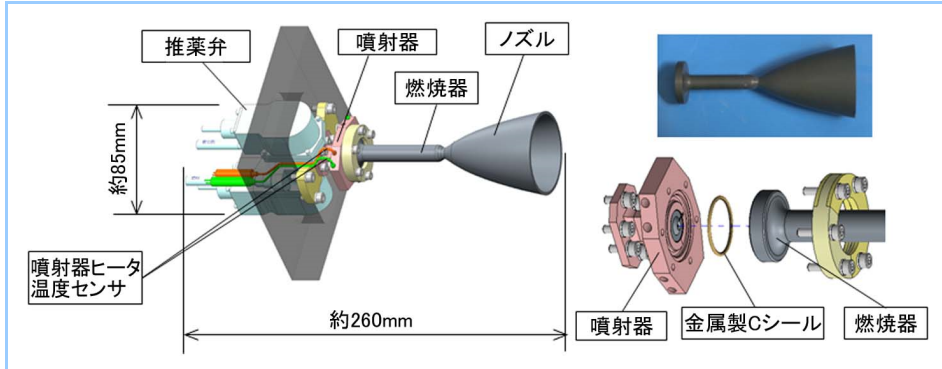


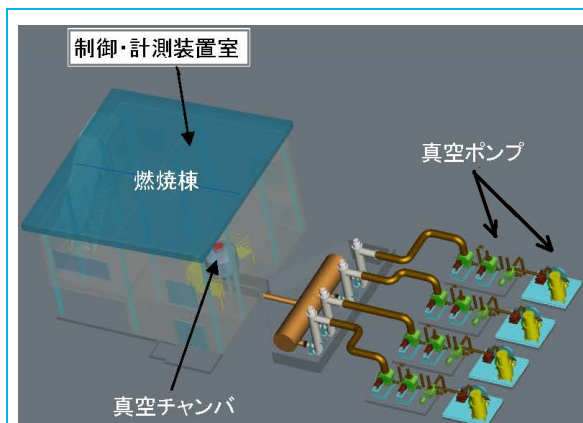
図3 10N 級セラミックススラスタ外観

また、パルス燃焼などの作動特性を取得するために、推薬弁は実機で使用が想定されるトルクモータタイプの一体型推薬弁を使用している。

本スラスタは、地上試験用の試作品であるが、実際の運用状態を模擬した高空燃焼試験で、性能及び熱的な評価が可能のように、衛星との接合インタフェースなどを実機に近いものとしたプロトタイプモデルである。

#### 3.2 高空燃焼試験

図4に示すように高空燃焼試験設備<sup>(1)</sup>は縦置きであり、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。宇宙空間での燃焼を模擬した試験を行うことができる設備で、排気能力は、500N 級までのスラスタを1Torr 以下の背圧で長秒時燃焼させることができる。10N 二液スラスタのセットアップ及び燃焼状況を図5に示す。



(a) 燃焼試験設備イメージ



(c) 縦置き真空チャンバ



(c) 真空ポンプ

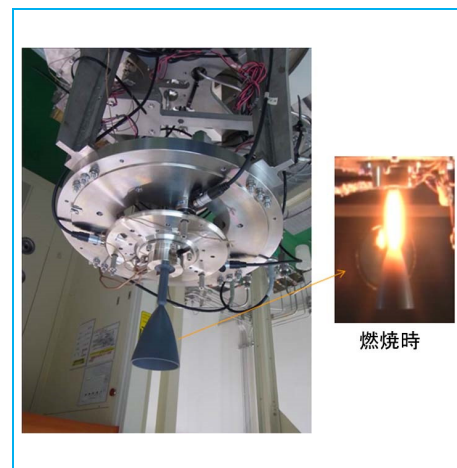


図5 10N スラスタセットアップ

図4 高空燃焼試験設備

### 3.3 燃焼試験結果<sup>(3)(4)</sup>

#### (1) 連続噴射特性

ノミナル条件における連続比推力は約 300s を達成しており、世界最高性能の 10N 二液スラスタの実現の目途を得た。他社スラスタの比推力と比較した結果を図6に示す。他社のフライト実績があるスラスタの比推力は、10N 級で 290s、20N 級で 302s である。当社の 10N 二液スラスタの連続比推力約 300s は、膨張比 180 の燃焼器を使用した結果であるが、膨張比を 300 に延長することで、約 5s の比推力向上の目途が得られており、他社の 20N 級スラスタを凌駕する可能性もある。

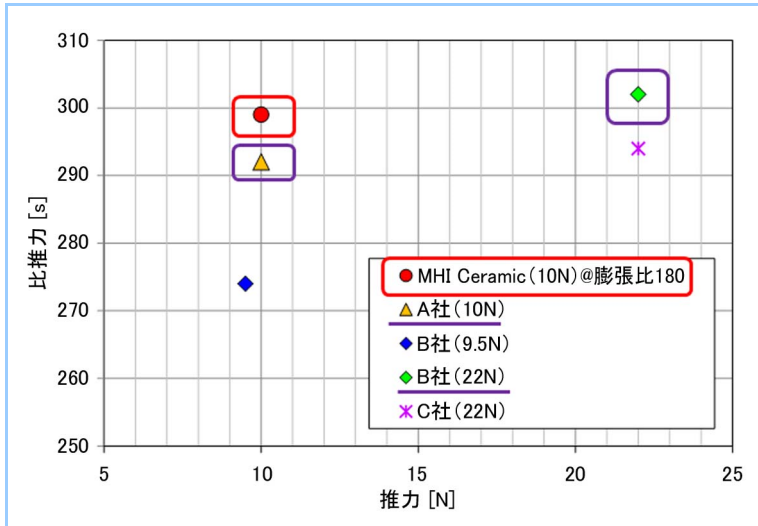


図6 他社との性能比較

次に連続噴射の作動実績を図7に示す。試験の結果、小推力スラスタに要求される作動範囲において問題なく作動することを確認した。作動範囲における燃焼器温度は 1200℃以下であり、窒化珪素系セラミックスの耐熱温度である 1500℃に対しては十分マージンがある。また、混合比と比推力の関係を図8に示す。ノミナル条件 (混合比 1.6) で比推力約 300s を達成した。

連続燃焼では、要求仕様の 14400s (4時間) に対して、最長 10800s (3時間) の燃焼実績があり、数時間の連続噴射をすることで 500N 級の軌道変換エンジンのバックアップとなり得る可能性を持つことが確認できた。

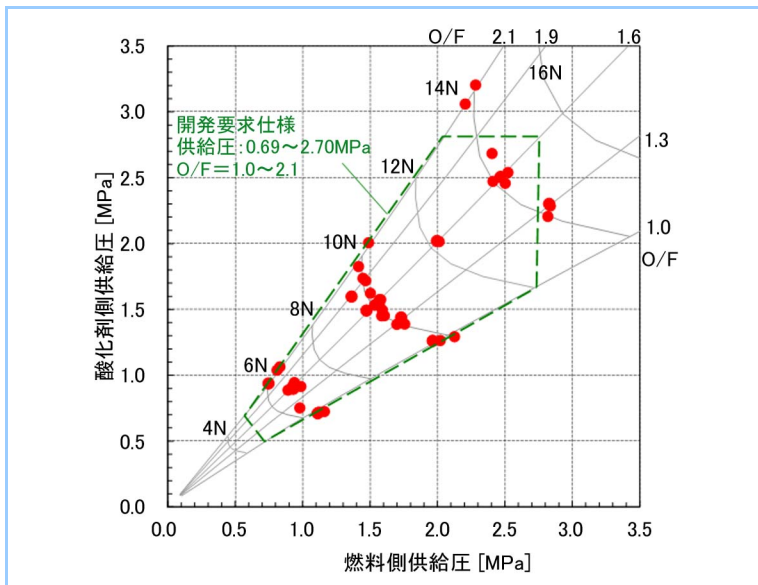


図7 作動実績

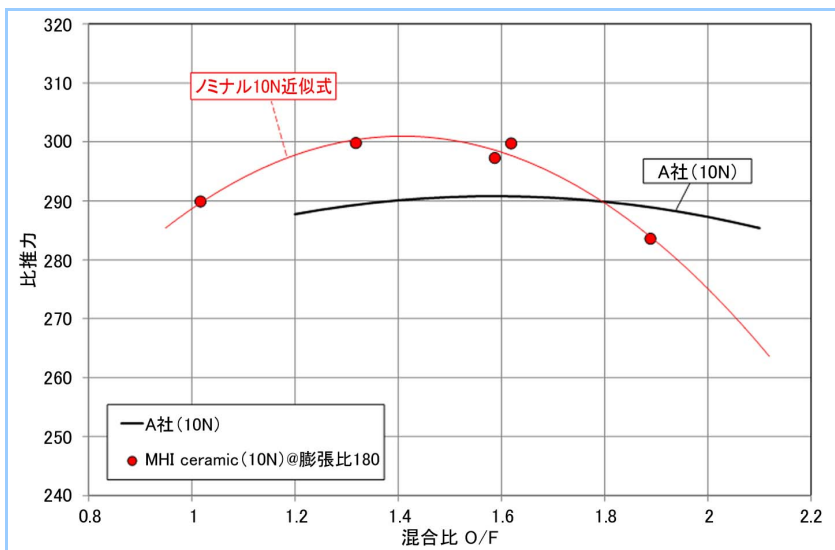


図8 連続比推力

(2) パルス噴射特性

パルス燃焼の噴射パターン実績を図9に示す。実機で使用が予想される代表的な噴射パターンで問題なく作動することが確認できている。次に比推力とインパルスビットの関係を図10に示す。比推力は他社スラストと比較してほぼ同等であること(小インパルスビットでは優位であること)が実証された。

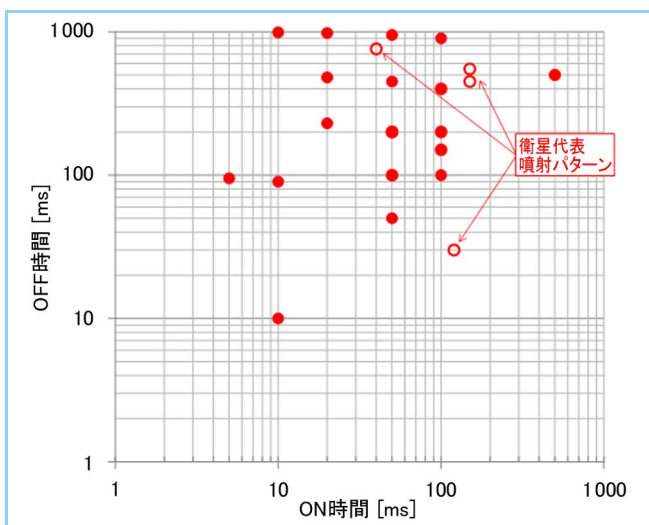


図9 パルス燃焼の噴射パターン

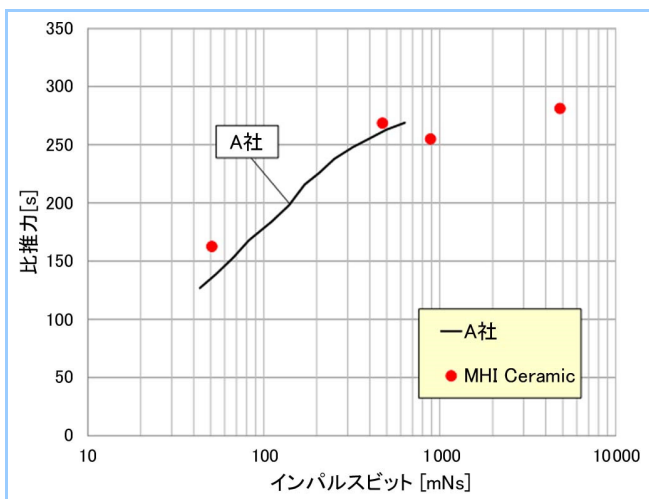


図10 比推力とインパルスビットの関係

また、一般的にスラスタ作動後は、燃焼器の熱が上流側に伝わるヒートソークバックにより、噴射器温度が上昇し、推薬がガス化して噴射不能となるため、一定時間の休止が必要である。一方、衛星の効率的な運用のために、スラスタの噴射パターン(連続・パルス作動)の組合せに制限がないことが望ましい。本スラスタの作動制約領域を確認するために、表3に示す温度的に厳しい複合パルス試験を実施した。その結果、噴射器、推薬弁ともに十分低い温度で抑えられており、スラスタは正常に作動することが確認でき、本スラスタの作動領域が広く、作動制約を課す必要がない可能性があることが示された。

表3 複合パルスパターン

No.	時間	噴射パターン
1	0~180s	連続 60s→休止 120s
2	180~400s	500msON/1s 周期×100 パルス→休止 120s
3	400~620s	100msON/1s 周期×100 パルス→休止 120s
4	620~840s	50msON/1s 周期×100 パルス→休止 120s
5	840~1060s	20msON/1s 周期×100 パルス→休止 120s
6	1060~1190s	10msON/0.1s 周期×100 パルス→休止 120s
7	1190~1320s	5msON/0.1s 周期×100 パルス→休止 120s
8	1320s~1380s	連続 60s

(3) 再着火試験

セラミックス製燃焼器と金属製噴射器間の気密保持構造として採用した金属製Cシールの耐久性を評価するため、Cシールに最大の負荷が印加される温度サイクルを模擬した接合部耐久性評価試験を実施した。本試験では、静止衛星の15年運用期間で1~2週間に1回の頻度で南北制御を行うと仮定し、スラスタに負荷される温度サイクルとして700サイクル(700回のスラスタ再着火)を設定し、実際の噴射試験により接合部に負荷を印加した。

接合部耐久性評価試験の典型的な温度履歴を図11に。燃焼圧、混合比、燃焼器温度の履歴を図12に示す。本試験では、合計704サイクルの噴射を実施し、燃焼圧、混合比及び燃焼器温度はほぼ一定で安定していること、また噴射試験終了後の性能確認燃焼試験で性能低下がなかったことから、接合部の耐久性があることを実証した。

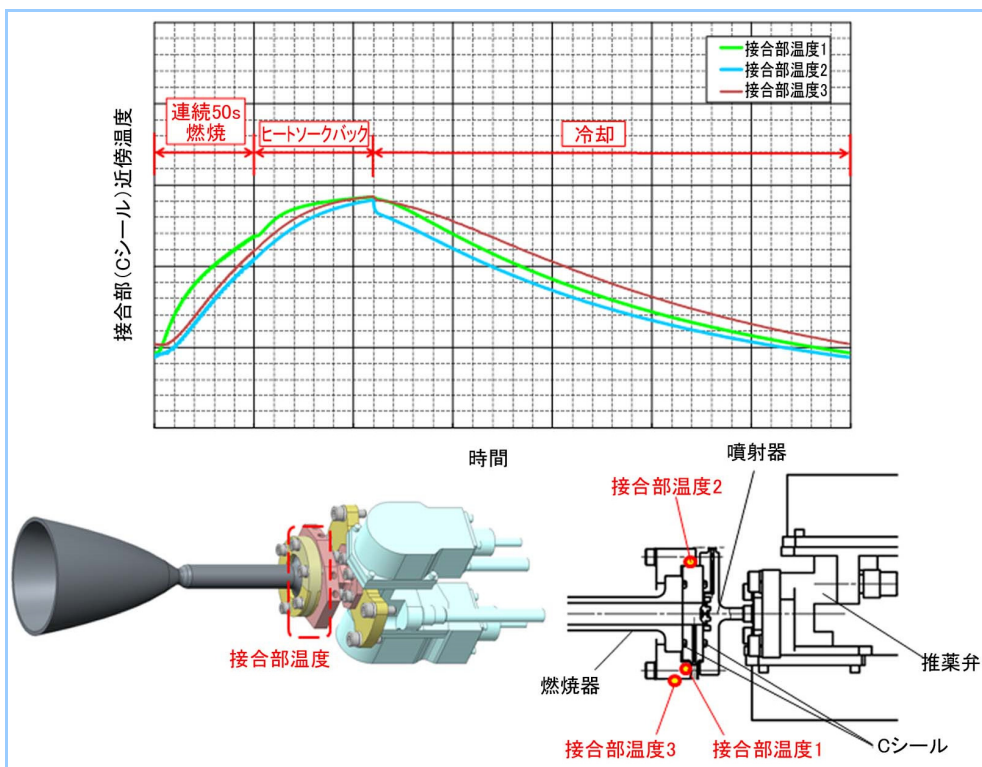


図11 接合部評価試験の温度サイクル履歴

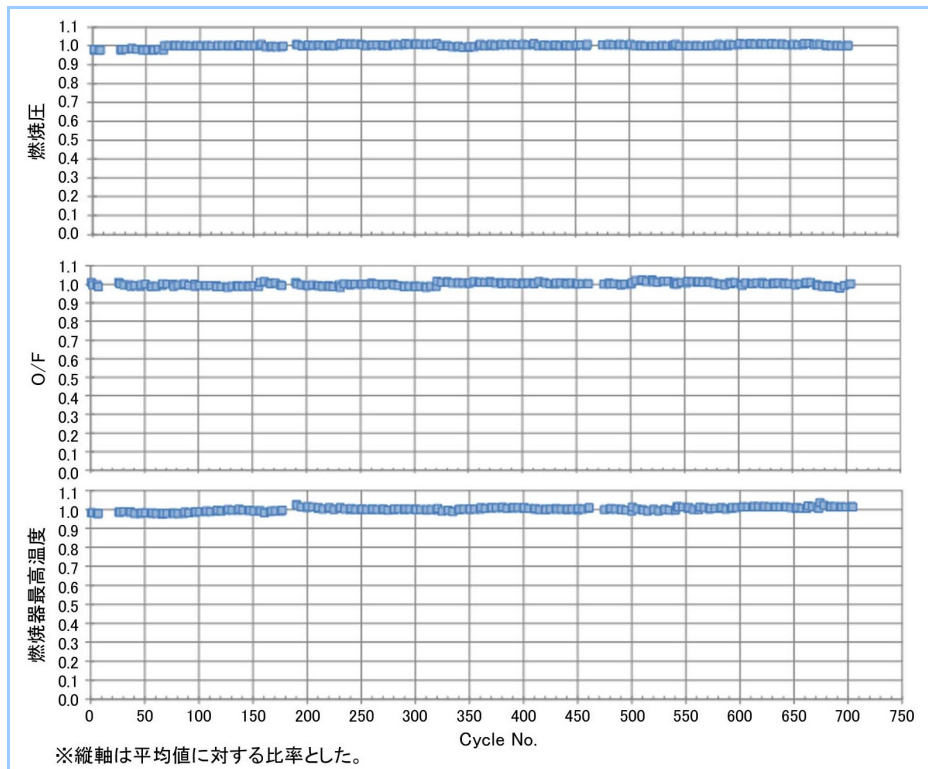


図 12 接合部耐久性試験結果

### 3.4 今後の開発計画

10N 二液スラスタの開発に向けて技術的な目途が立ったため、機械環境耐性や寿命(累積噴射時間 15 時間以上, 総パルス百万回以上)確認を認定試験として実施し, 表2に示す要求性能を満足することを検証する計画である。

また、10N 二液スラスタのさらなる信頼性向上を目指し、現在の機械接手(Cシール)より信頼性が高いセラミックス製燃焼器と金属製インジェクタの接合技術の研究を進めている<sup>(5)</sup>。

## 4. まとめ

当社で開発中の 10N 二液スラスタの概要と開発成果について報告し、今後の開発計画について紹介した。地上試験用スラスタの燃焼試験で、海外競合他社製品を上回る世界最高性能の 10N 二液スラスタの実現に向けた技術的な目途を得ることができており、今後は認定試験を実施し、商用衛星搭載に向けて開発を加速させていく。

## 参考文献

- (1) T. Matsuo, et al., Development of 500N ceramic thruster for the PLANET-C Venus explorer; Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review V1.45 No.4 (Dec. 2008)
- (2) 田中他“人工衛星用セラミックススラスタの開発”セラミックス, 第 49 巻第 12 号(2014)
- (3) G. Fujii, et al., Research and development status of 10N MMH/MON-3 bipropellant ceramic thruster, Space Propulsion 2016
- (4) 藤井他, 10N 級2液式セラミックススラスタの性能特性確認試験結果, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016
- (5) 戸部他, セラミックス/金属接合スラスタの開発, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016