

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1427

C/C複合材を適用した高耐久性RCSスラスタの研究
《SiC/C - FGM 燃焼室耐久性評価試験》

佐藤 政裕 ・ 只野 真 ・ 日下 和夫
新野 正之 ・ 毛呂 明夫

2001年7月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

航空宇宙技術研究所報告 1427 号

平成 13 年 7 月 発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7-44-1

電話 (0422) 40-3935 〒182-8522

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山 5-6-17

© 2001 航空宇宙技術研究所

※本書（誌）の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書（誌）からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡ください。

※本書（誌）中、本文については再生紙を使用しております。

Printed in Japan

航空宇宙技術研究所報告

TR-1427



目次

概要	1
第1章 まえがき	2
第2章 スラスタ仕様	2
2.1 スラスタ	2
2.2 噴射器	2
第3章 試験設備および計測項目	3
3.1 試験設備	3
3.2 計測項目	4
第4章 第一次試作燃焼室	4
4.1 燃焼室製作	4
4.2 試験方法及び試験条件	5
4.3 試験結果	7
4.3.1 性能確認試験	7
4.3.2 耐久性評価試験	7
4.3.2.1 燃焼室外壁温度	7
4.3.2.2 内視鏡観察	9
4.3.2.3 X線CT検査	13
4.3.3 SiC耐酸化コーティング層剥離の原因推定	13
第5章 第二次試作燃焼室	14
5.1 燃焼室製作	14
5.1.1 SiC耐酸化コーティング層の剥離対策	14
5.1.2 高膨張化にともなう製作技術の確立	14
5.2 試験方法及び試験条件	15
5.3 試験結果	16
5.3.1 高空性能確認試験	16
5.3.2 耐久性評価試験	16
5.3.2.1 燃焼室外壁温度	16
5.3.2.2 内視鏡・レーザ形状測定装置観察	19
5.3.2.3 X線CT検査	20
第6章 第三次試作燃焼室	21
6.1 燃焼室材選定	21
6.1.1 エロージョン試験	21
6.1.2 燃焼室製作	22
6.2 試験方法及び試験条件	22
6.3 試験結果	24
6.3.1 耐久性評価試験	24
6.3.1.1 燃焼室外壁温度	24
6.3.1.2 内視鏡・レーザ形状測定装置観察	26
6.3.1.3 X線CT検査	30
第7章 まとめ	30
付録 1. シリンダ式流量計	30
2. 600Nスラスタのパルス作動燃焼性能	31
2.1 試験概要	31
2.2 性能	32
参考文献	33

C/C複合材を適用した高耐久性 RCS スラスタの研究 《SiC/C - FGM 燃焼室耐久性評価試験》*

佐藤 政裕*¹, 只野 真*¹, 日下 和夫*¹
新野 正之*¹, 毛呂 明夫*¹

Application of C/C composites for RCS engines. (Evaluation test of SiC/C-FGM coatings chambers)*

Masahiro SATO *¹, Makoto Tadano *¹, Kazuo Kusaka *¹
Masayuki Niino *¹ and Akio Moro *¹

ABSTRACT

Three kinds of carbon fibers-reinforced carbon matrix (SiC/C)-functionally graded materials (FGMs) chambers were cyclically tested using the bipropellant of nitrogen tetroxide (NTO) /monomethyl hydrazine (MMH) to evaluate their durability, aiming for use in future reusable reaction control system (RCS) engines.

Firing test were performed, at $P_c=0.9\text{MPa}$, $MR=1.65$, to evaluate the durability and performance using the three kinds chambers, i. e., the nozzle expansion ratio ϵ of the first made chamber is 1.75, that of the third made chamber is 7, and that of the second chamber is 30. The items evaluated in the test series were durability under repeated combustion test and engine performance in terms of vacuum specific impulse (I_{spv}).

After the cycle tests, these chambers were inspected to evaluate the damage mode using the non-destructive method. In the third made chamber, to which was applied both the 8-harness satin fabrics arrangement of the fibers and $40\mu\text{m}$ FGM layer/C-SiC matrix, the damage seemed to be less than that to the first and second chambers.

The final goal of the durability for this third made chamber is 7465 times for the cycle test.

概 要

近い将来における宇宙輸送系システムの再使用化のため、姿勢制御用 (RCS) スラスタにおいても軽量、高耐久性且つ高性能化が課題となる。我々はこの課題達成のため、燃焼室材料に従来のコロンビウム合金等の金属材料にかわって軽量で高耐熱性且つ高温でも高比強度を併せ持つ炭素繊維強化炭素複合材 (C/C材) を候補として選定した。

耐酸化コーティング材は、炭化珪素 (SiC) を用い、C/C材と SiC との間の熱応力緩和層としては、傾斜機能概念に基づく組成傾斜 (FGM) を適用した。この概念に基づき製作法を変えた推力 1200N 級の 1 次試作燃焼室 (海面高度用、ノズル膨張比 1.75) と、2 次試作燃焼室 (高空用、ノズル膨張比 30)、及び 3 次試作燃焼室 (海面高度用、ノズル膨張比 7) の 3 種 3 体を製作した。本材料の燃焼室への適用性を調べるため、燃焼器の評価は、(1) 耐久性、(2) 性能、の確認を主目的とし耐久性については非破壊検査によ

* 平成 13 年 4 月 2 日受付 (received 2 April 2001)

*¹ 角田宇宙推進技術研究所 ロケット推進研究センター (Kakuda Space Propulsion Laboratory)

り損傷評価を行った。

燃焼試験は燃焼圧 1.0MPa、混合比 1.65 の一定条件で行った。その結果、2 次試作燃焼室では高温部でコーティング層の剥離が生じたものの、当初目標とした 3600 回の繰り返し燃焼試験を達成し、高性能化の可能性も確認できた。3 次試作燃焼室ではさらに耐久性の向上が得られ 7465 回の繰り返し燃焼試験を達成し、実用化の可能性が示された。本報ではこれまでの試験、並びに評価結果について述べる。

第 1 章 まえがき

今後の宇宙輸送システムは輸送コストの大幅なコストダウンの必要性から再使用が前提となっている。そのためには姿勢制御用（Reaction Control System 以下 RCS と略す）スラスタにおいても再使用型スラスタの開発が必須である。再使用化によるコストダウンを実現するためには RCS スラスタにおいても軽量化、高耐久性、性能の向上が重要な課題となる。そこで我々はこの課題達成のため RCS スラスタの燃焼室材料に、従来用いられているコロンビウム合金 C103（以下 C103 と略す）にかわる新材料の利用を考えた。そして軽量で高耐熱性且つ 2273K の高温でも高比強度を併せ持つ炭素繊維強化炭素複合材（以下 C/C 材と略す）を候補として選定した。

しかし、この C/C 材は耐酸化性に乏しいため耐酸化コーティングが必要である。コーティング材には SiC を用いることとしたが、C/C 材との熱膨張率の差から高、低温の繰り返しにより剥離が生じ易い。そこで燃焼室製作にあたってはこの不具合を抑制する有効な手段として、C/C 材と SiC との間に熱応力緩和層、いわゆる傾斜機能概念によるコーティング技術を用いた FGM 層を設けて製作した¹⁾。

燃焼室は 1 次試作燃焼室（海面高度用、ノズル膨張比（ノズル出口面積／ノズルスロート面積で以下 ϵ と略す）1.75）と、1 次試作燃焼室の試験結果をもとに後述する改良を加えた 2 次試作燃焼室（高空用、 $\epsilon = 30$ ）、及び 3 次試作燃焼室（ $\epsilon = 7$ ）の 3 種 3 体を製作した。

燃焼試験での評価は (1) 繰り返し燃焼試験による耐久性、(2) スラスタ性能の確認である。又、耐久性評価では燃焼試験の期間中、損傷の進行を非破壊検査により把握することによって寿命予測をおこなう手法の確立を目指す事も目的とし、そのための基礎データを得た。

第 2 章 スラスタ仕様

2.1 スラスタ

本研究において目標としたスラスタは、近い将来に実現を目指す有翼宇宙往還機（以下 HOPE-X と略す）用推進系に用いられる RCS 用の小推力スラスタである。このスラスタは、ヨー、ロール、ピッチ用に用いられるもので、今回想定したスラスタは主にヨー方向の制御に使用するもので目標とした仕様を表 1 に示した。

従来は C103 等の金属製の燃焼室が使用されているのが一般的であるが、軽量化の実現も狙っていることから、燃焼室の材料として C/C 材を使用する事とした。

HOPE-X 用 RCS スラスタ搭載を想定し、試算した燃焼室重量の比較を表 2 に示す。C/C 材を用いれば 16.8Kg の重量が軽減され、従来の金属燃焼室ベースの推進系トータル重量（ドライ重量）約 183Kg に対して 10% の重量軽減が図られ、軽量化が可能である。

2.2 噴射器

試験に用いた噴射器は、以前²⁾ 推力 2000N 級二液式スラスタ用に開発したフィルム冷却式噴射器をベースにして設計したものである。噴射器の概略を図 1 に示す。噴射方式は、異種 2 点衝突型で円周上にエレメントを配置

表 1 スラスタ仕様

推進剤	四酸化二窒素(NTO)/モノメチルヒドラジン(MMH)		
推力	1200 (N)		
比推力	定常	311 (秒)	
	50ms パルス	240 (秒)	
燃焼圧	1 (MPa)		
混合比	1.65 (-)		
ノズル開口比	100 (-)		
作動パルス数	3600 (回)		
連続作動時間	120 (秒)		

表 2 燃焼室重量の比較

燃焼室材料	1200N 燃焼室			250N 燃焼室			合計重量
	単位重量	搭載基数	搭載重量	単位重量	搭載基数	搭載重量	
C/C (SiC, FGM)	1.8kg	4	7.2kg	0.6kg	8	4.8kg	12.0kg
コロンビウム C103	4.4kg	4	17.6kg	1.4kg	8	11.2kg	28.8kg
						重量利得	16.8kg

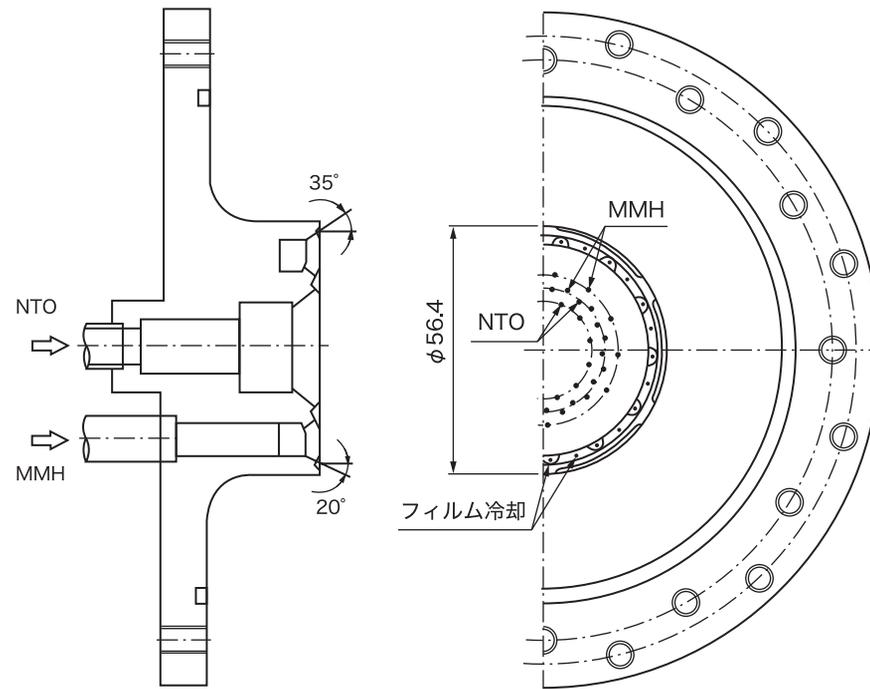


図1 噴射器概略

しエレメント数は26個、フィルム冷却も26個でフィルム冷却率は17%である。

噴射器と燃焼室の接合法は、燃焼室フランジ部に金属板をあてボルトで押え付ける方法とし、シール材にはグラメット付きグラファイトパッキンを使用した。

第3章 試験設備および計測項目

3.1 試験設備

耐久性および性能確認試験はロケット高空性能試験設備³⁾を用いて行った。試験設備の概要を図2に、推進薬

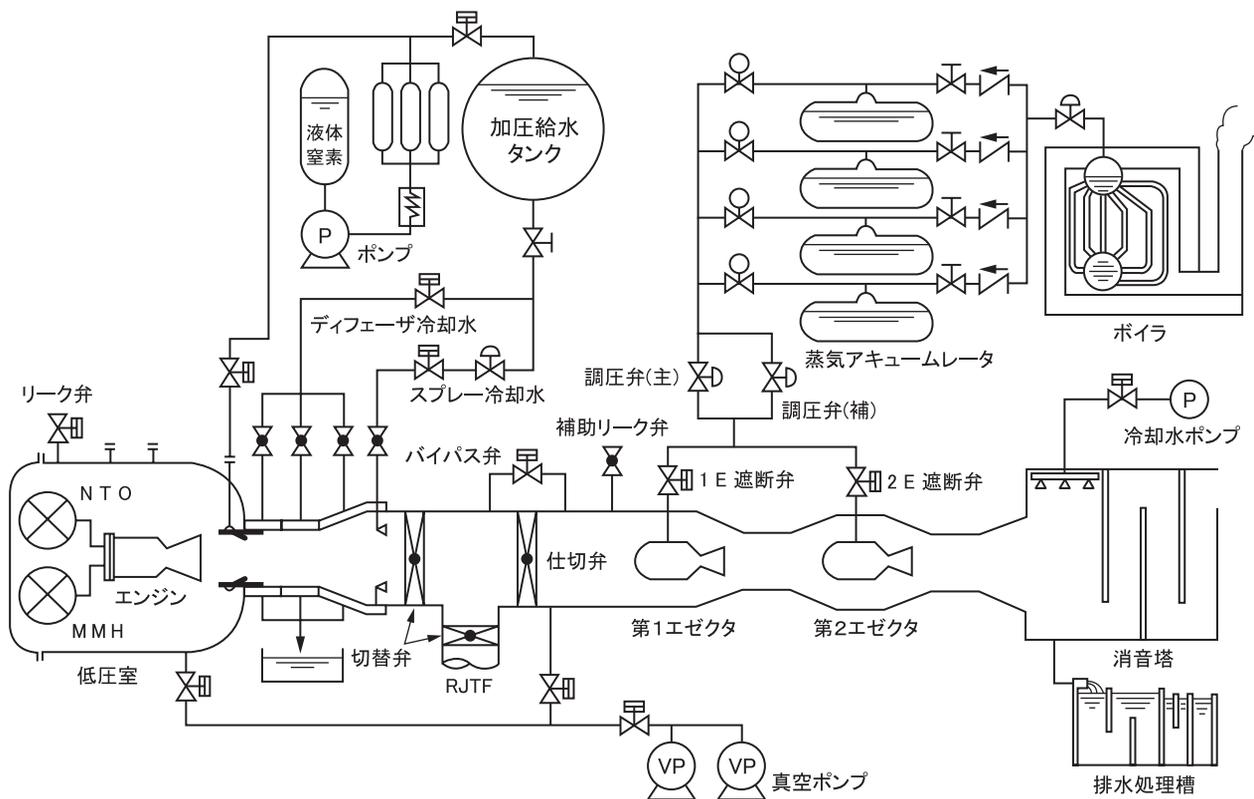


図2 ロケットエンジン高空性能試験設備概要

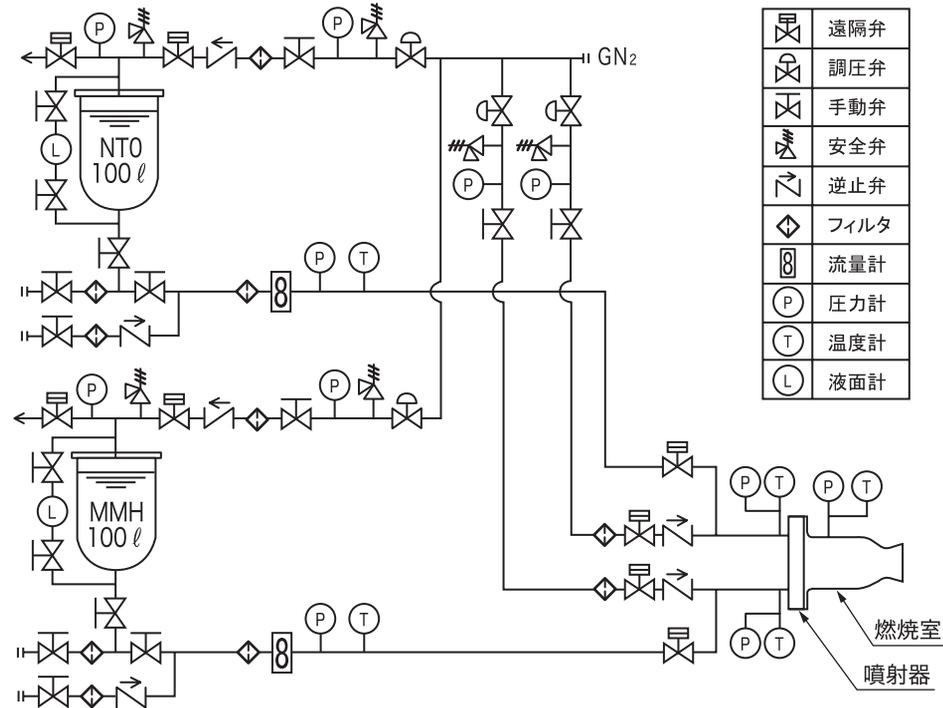


図3 推進薬供給装置概略

供給装置の概略を図3に示す。スラスタの推進剤としては、酸化剤に四酸化二窒素 (NTO) , 燃料にモノメチルヒドラジン (MMH) の貯蔵性二液推進剤を使用した。燃料, 酸化剤共にタンクの容量は100リットル, 最大使用圧力は7MPaで, タンクから加圧, 圧送され噴射器に供給される。燃焼試験は, 最大で500秒まで可能である。

耐久性評価試験では低圧室を開放にして大気圧環境で行い, デフューザに取付けた窒素ガスエゼクタにより燃焼ガスを吸引した。高空性能確認試験では低圧室を密閉して蒸気により吸引し真空環境下で行った。

表3 計測項目

計測項目	使用センサー
酸化剤タンク圧	NMB製 DHF - 5MPa
燃料タンク圧	NMB製 DHF - 5MPa
酸化剤ライン圧	NMB製 DHF - 5MPa
燃料ライン圧	NMB製 DHF - 5MPa
酸化剤噴射器入口圧	NMB製 DHF - 5MPa
燃料噴射器入口圧	NMB製 DHF - 5MPa
酸化剤ライン温度	岡崎製作所 JIS-K シースφ 1.6
燃料ライン温度	岡崎製作所 JIS-K シースφ 1.6
酸化剤噴射器入口温度	岡崎製作所 JIS-K シースφ 1.0
燃料噴射器入口温度	岡崎製作所 JIS-K シースφ 1.0
燃焼圧	NMB製 DHF - 2MPa
燃焼室外壁温度	AVIO製 TVS - 2000mk II
低圧室圧	B&H製 0.5Psia

3.2 計測項目

耐久性および, 性能確認試験で測定した計測項目を表3に示す。データはパルスモードに対応できるように0.001秒のサンプリング速度で集録した。燃焼室外壁温度に関しては, 非接触による放射温度計を使用した。燃焼試験後における非破壊検査については4章以降の耐久性評価試験のなかで述べるが, 内視鏡, X線CT装置, レーザ形状測定装置を用いて行った。

第4章 第一次試作燃焼室

4.1 燃焼室製作

燃焼室製作工程の概略を図4に示す。ピッチ系炭素繊維 (Granoc XN-C25 : 日本グラファイトファイバー製) のバイアス織物にフェノール樹脂を含浸したプリプレグをSUS製金型に巻付け, シリコンゴム外型を用いて加圧, 加熱を行い炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を成形する。この成形体を炭化, 高温焼成しC/C材を得る。この段階のC/C材はポラスで強度が低いため, 石油ピッチの含浸, 熱間静水圧加圧 (Hot Isostatic Pressing : HIP) 装置を用いた炭化及び高温焼成という緻密化処理を十分な密度になるまで繰り返し行い強度を得る。本燃焼室では, 緻密化処理を8回実施した。C/C材の内外面には, 耐酸化コーティングとしてSiCのコーティングを行うが, C/C材とSiC層の熱膨張率の違いによって発生するSiCコーティング層の剥離を防ぐため, はじめに熱応力緩和層として化学気相含浸 (CVI) 法により30 μm

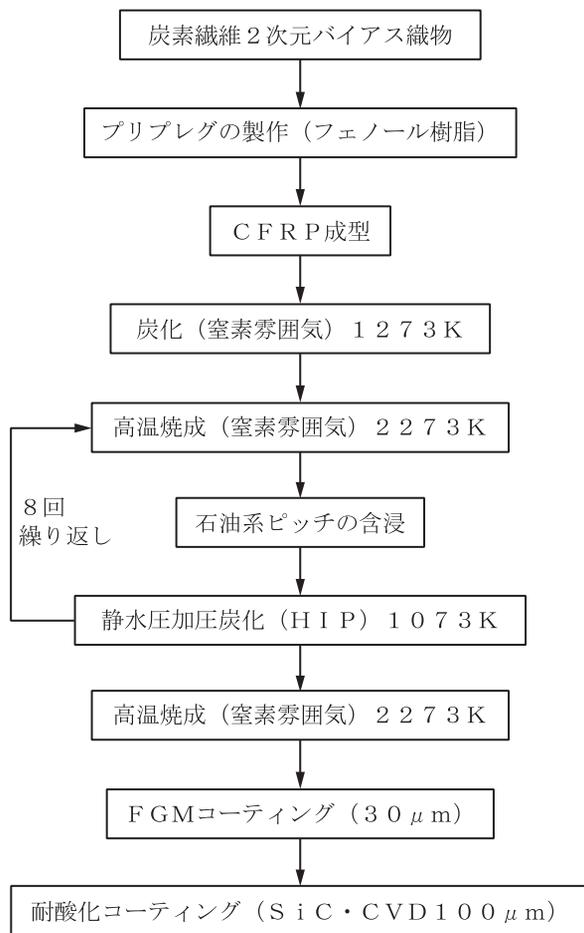


図4 一次試作燃焼室製作工程概略

のFGM層を設け、その上に化学気相析出(CVD)法によりSiC層を100 μ m設けた。試作した燃焼室の外観を図5に、燃焼室の設計値と実測値を表4に示す。試作した燃焼室は全長、平行部内外径については、ほぼ設計値に近い値となっているが、ノズルスロート径は設計値より約1.5mm大きくなっている。また、 ϵ は大気圧燃焼試験のため1.75とした。

4.2 試験方法及び試験条件

燃焼試験は海面高度で実施した。スラスタ性能確認のための定常燃焼試験(30, 60秒)と2種類の短秒時燃焼試験(ここではパルスモード燃焼試験という)で燃焼室の耐久性試験を実施した。

RCSスラスタはパルス作動(最小燃焼時間0.05秒(50msec.)程度)が主となるが、試験設備の制約から燃焼時間を短くすることができないため、ここでは5秒ON/6秒周期を10回繰り返すモードと1秒ON/2秒周期を30回繰り返すパルスモード燃焼試験を実施した。試験経緯を表5に示す。始めにスラスタ性能確認のため燃焼圧力(P_c)、混合比(MR :酸化剤質量流量/燃料質量流量)を変化させた30秒の定常試験を9回行い、これ以降



図5 一次試作燃焼室外観

表4 燃焼室の設計値と実測値

	設計値(mm)	実測値(mm)
燃焼室全長	120.3	120.73
平行部内径	$\phi 57.0$	$\phi 57.38$
平行部外径	$\phi 65.0$	$\phi 65.04$
燃焼室厚さ	4.0	3.83
スロート径	$\phi 30.6$	$\phi 30.10$

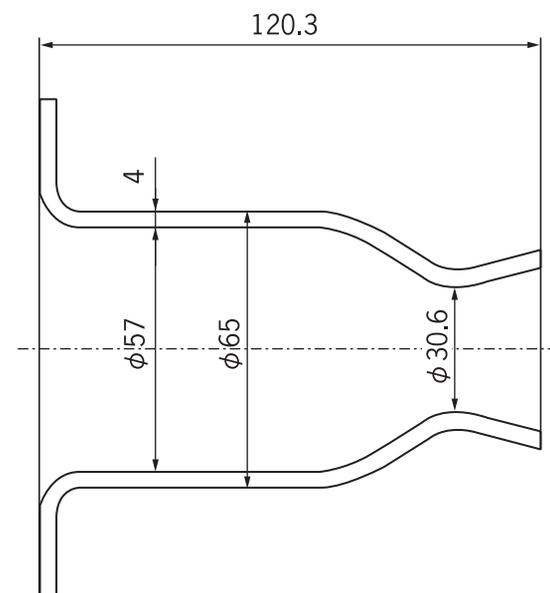


表5 一次試作燃焼室試験経緯

試験番号	定常燃焼 (sec.)	パルス燃焼	サイクル (回)	累積サイクル数 (回)	累積燃焼時間 (sec.)
5001	5		1	1	5
5002	30		1	2	35
5003	30		1	3	65
5004	30		1	4	95
5005	30		1	5	125
5006	30		1	6	155
5007	30		1	7	185
5008	30		1	8	215
5009	30		1	9	245
5010	30		1	10	275
5011	コロンビウム 103 燃焼室による 5sec. ON/6sec. 周期予備確認試験				
5012		5sec.ON/6sec. 周期	10	20	325
5013		5sec.ON/6sec. 周期	10	30	375
5014		5sec.ON/6sec. 周期	10	40	425
5015		5sec.ON/6sec. 周期	10	50	475
5016		5sec.ON/6sec. 周期	10	60	525
5017		5sec.ON/6sec. 周期	10	70	575
5018		5sec.ON/6sec. 周期	10	80	625
5019		5sec.ON/6sec. 周期	10	90	675
5020		5sec.ON/6sec. 周期	10	100	725
5021		5sec.ON/6sec. 周期	10	110	775
5022	60		1	111	835
5023		1sec.ON/2sec. 周期	30	141	865
5024		1sec.ON/2sec. 周期	30	171	895
5025		1sec.ON/2sec. 周期	30	201	925
5026		1sec.ON/2sec. 周期	30	231	955
5027		1sec.ON/2sec. 周期	30	261	985
5028		1sec.ON/2sec. 周期	30	291	1015
5029		1sec.ON/2sec. 周期	30	321	1045
5030		1sec.ON/2sec. 周期	30	351	1075
5031		1sec.ON/2sec. 周期	30	381	1105
5032	30 非常停止		1	382	1108

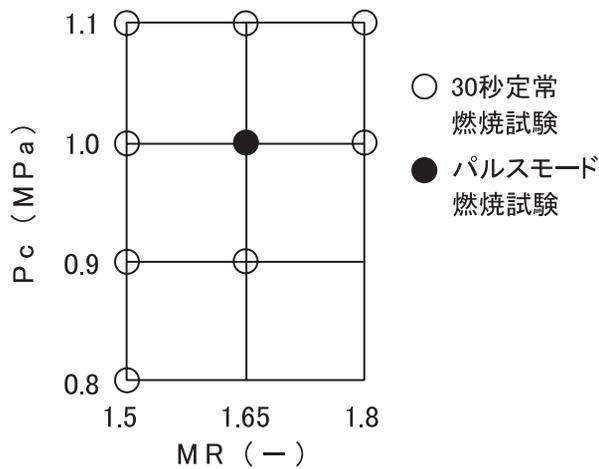


図6 試験条件マトリックス

の耐久性試験は燃焼圧力1MPa, 混合比1.65一定とした。試験条件マトリックスを図6に示す。

耐久性試験は燃焼室より燃焼ガスが漏洩する(損傷部が貫通)まで実施した。

4.3 試験結果

4.3.1 性能確認試験

スラスタ性能確認のための30秒の定常試験を図6の○に示す条件で実施した。混合比と燃焼圧力の各パラメータに対する特性排気速度 C^* を図7に示す。

C^* は次式により算出した。

$$C^* = g_c \times P_{c, inj} \times f_p \times A_{th} \times f_{dis} / m_t$$

ここで $P_{c, inj}$ は測定による燃焼圧力, A_{th} はノズルスロート断面積, m_t は推進薬の全質量流量である。また, f_p はノズルスタグネーション圧力の補正係数, f_{dis} はノズルスロートの流出係数である。特性排気速度は燃焼室圧力依存性はなく, 混合比依存性が高い傾向を示し, 低混合比で高く高混合比で低い特性となっている。C/C材燃焼室は気密性が問題となるが, ●で示す同形状のC103燃

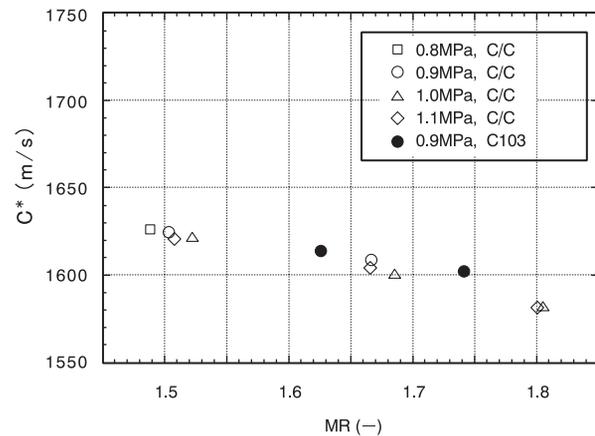


図7 混合比と特性排気速度

焼室とほぼ同じ値となっていることから, 気密性について問題のないことが判る。

4.3.2 耐久性評価試験

燃焼試験は表5に示す経緯で行い, 試験番号(以下T/Nと略す)5032(累積サイクル数382回, 累積燃焼時間1108秒)において燃焼室の損傷により燃焼ガスが漏洩したため試験を終了とした。

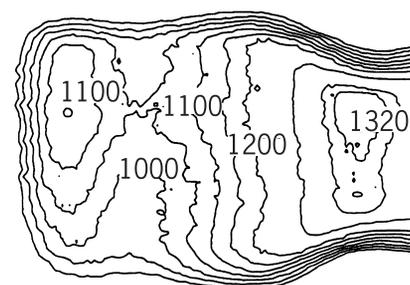
燃焼室の耐久性に関しては, 放射温度計により燃焼試験中の燃焼室外壁温度を計測し, 内視鏡による燃焼室内壁の観察を毎回試験後に実施し損傷の発生及び進行状況を把握した。また, X線CTによる断層検査は試験前, 試験終了後を含め7回行い, 燃焼室外壁温度及び内視鏡による燃焼室内壁の観察結果と比較を行った。

4.3.2.1 燃焼室外壁温度

燃焼室のように高温で全体の温度及び温度分布を計測する方法としては, 非接触式の放射温度計が適している。放射温度計による30秒定常試験の燃焼停止直前の燃焼室外壁温度分布を図8に示す。放射率は以前に実施した測定結果⁴⁾から0.85と設定した。燃焼室外壁温度はフィルム冷却の効果により平行部で最も低く約1000Kとな



放射温度計 ($\epsilon = 1$)



温度分布 ($\epsilon = 0.85$)

図8 燃焼室外壁温度分布

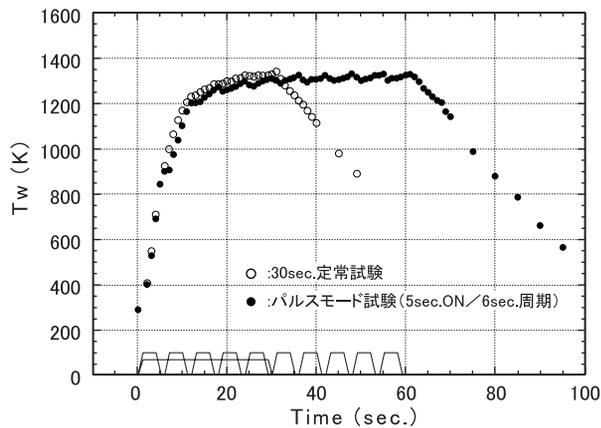


図9 燃焼室ノズルスロット部外壁温度の時間履歴

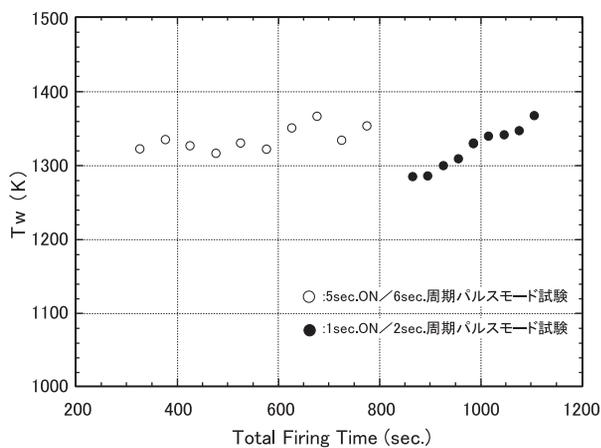
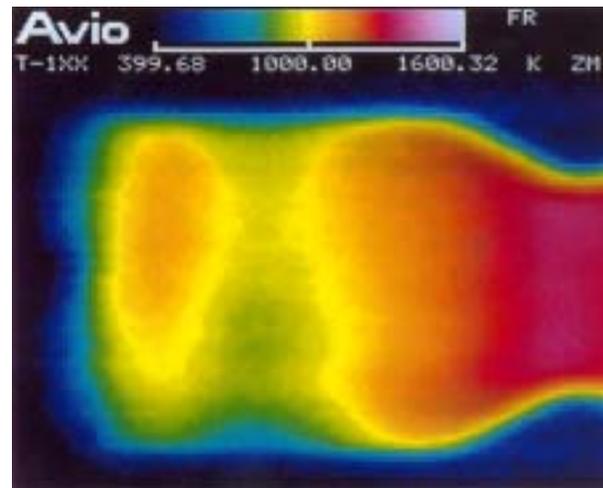


図10 燃焼室ノズルスロット部外壁温度の変化

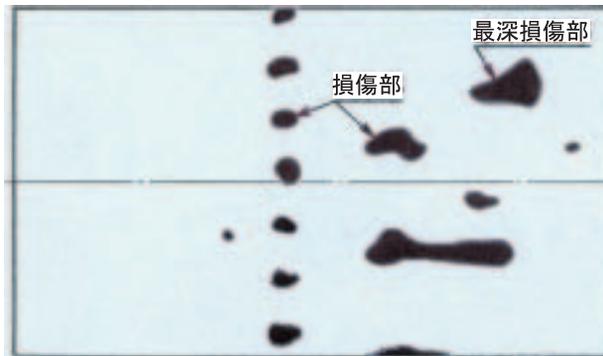
っている。最も高いノズルスロット部では約1320Kとなっている。この温度から一次元熱伝導解析で求めた内壁温度は約1500Kとなった。30秒定常及び5秒ON/6秒周期のpulseモード試験における燃焼室ノズルスロット部の外壁温度の時間履歴を図9に示す。定常、pulseモード試験とも最高外壁温度は同程度の温度となっている。また、pulseモード試験の1秒間の燃焼停止における燃焼室外壁温度の低下は約50Kとなっている。

累積燃焼時間に対するノズルスロット部外壁温度の変化を図10に示す。図示した点は、pulseモード試験の最終燃焼時のノズルスロット部外壁温度を示す。T/N5017(累積サイクル数70回、累積燃焼時間575秒)までは、ほぼ一定の値を示しているが、それ以降では徐々に増加する傾向を示し、1秒ON/2秒周期のpulseモード試験では、ほぼ直線的に増加している。これは、後述するように燃焼室内壁の損傷の進行が原因と思われる。

放射温度計を用いることにより、外壁温度の測定を行うとともに、以前、C103燃焼室においてフィルム冷却の状態が外壁温度によく現われていたことから、本燃焼室でも内壁の損傷の状況をとらえられないか試みた。図11



燃焼室外壁温度



燃焼室外壁損傷部展開図

図11 燃焼室外壁温度と燃焼室内壁損傷部

に60秒定常試験の停止直前の外壁温度分布と、内視鏡の観察におけるこの部分に対応した内壁の損傷部展開図を示す。損傷は最も深いところで約1.6mmとなっているが、上図の燃焼停止直前の外壁温度に変化は見られなかった。原因として、ここでは燃焼室全体の温度分布を把握するため外壁温度の測定範囲を約1200Kと広くしていたこと、また、2次元織物積層のC/C材は繊維方向(周方向)に対し積層方向(半径方向)の熱伝導率が小さく60秒の定常試験停止直前の外壁温度では全体に平均化された状態で現われるためと考えられる。次に、1秒ON/2秒周期のpulseモード試験でノズルスロット部が定常となっていない着火後10秒の外壁温度分布を図12に示す。観察位置は図11と同一である。温度計測範囲は上から約1200K、約500K、約300Kで最深損傷深さは2.6mmから2.3mmとなっている。温度計測範囲が約1200Kでは損傷部に対応する外壁温度の変化は見られないが、温度計測範囲を約500Kとした場合には、最深損傷部に対応する部分に高温部が明確に現われている。さらに温度計測範囲を約300Kと狭くした場合には、温度表示領域が狭くなるため最深損傷部に対応した高温部がわずかに

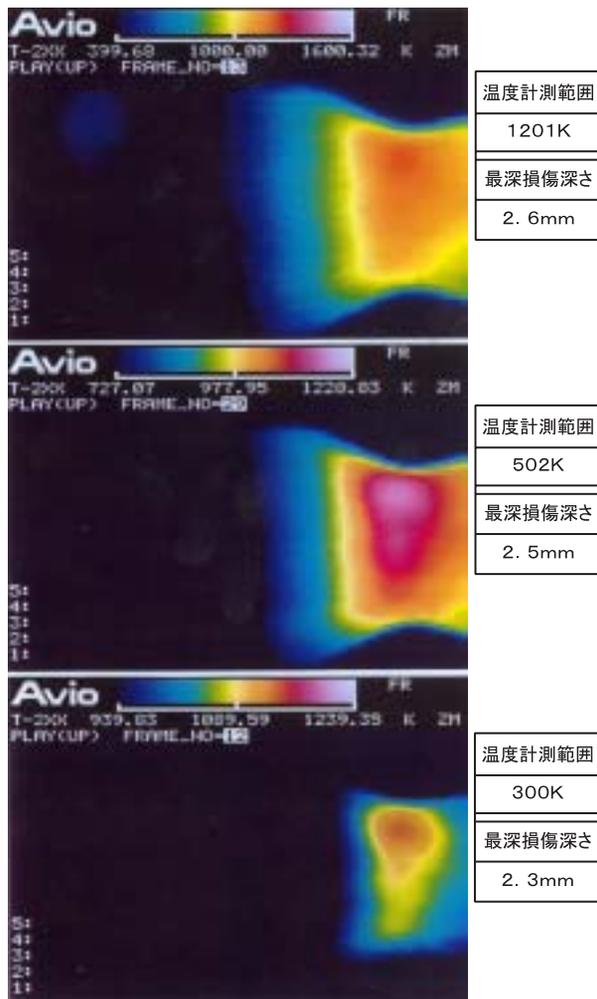


図12 温度計測範囲の変化

現われる結果となっている。燃焼室内壁の損傷を外壁温度でとらえることは、熱伝導率の異方性のないC103燃焼室に比べ、周方向に対し半径方向の熱伝導率が小さいC/C材燃焼室では困難となるが、今回実施したように損傷が進行した状態において、温度計測範囲を適切に設定することにより損傷部をとらえることが可能となった。

4.3.2.2 内視鏡観察

内視鏡による燃焼室内壁の観察は、燃焼室をテストスタンドにセットした状態で毎回試験後に行った。観察の様子を図13に示す。カメラを装着した内視鏡(視野角度: 40° ~ 120°)を制御装置に取り付け、燃焼室内に挿入し360°回転する。次に軸方向に移動し360°回転させる方法で燃焼室内壁全面について観察を行った。内視鏡の回転と軸方向の移動はプログラムにより制御し、同一箇所での損傷発生及び進行状況を観察できるようにした。

図14に示す、①~④の4ヵ所の同一箇所でのT/N5022後(累積サイクル数111回、累積燃焼時間835秒)までの内視鏡観察結果を図15~図18に示す。図14には、60

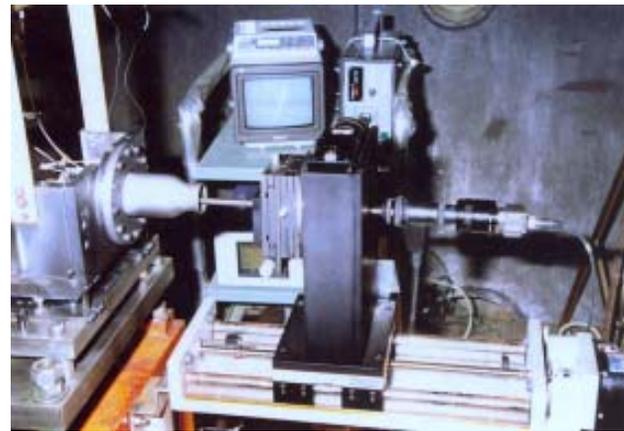


図13 燃焼室内壁の内視鏡観察

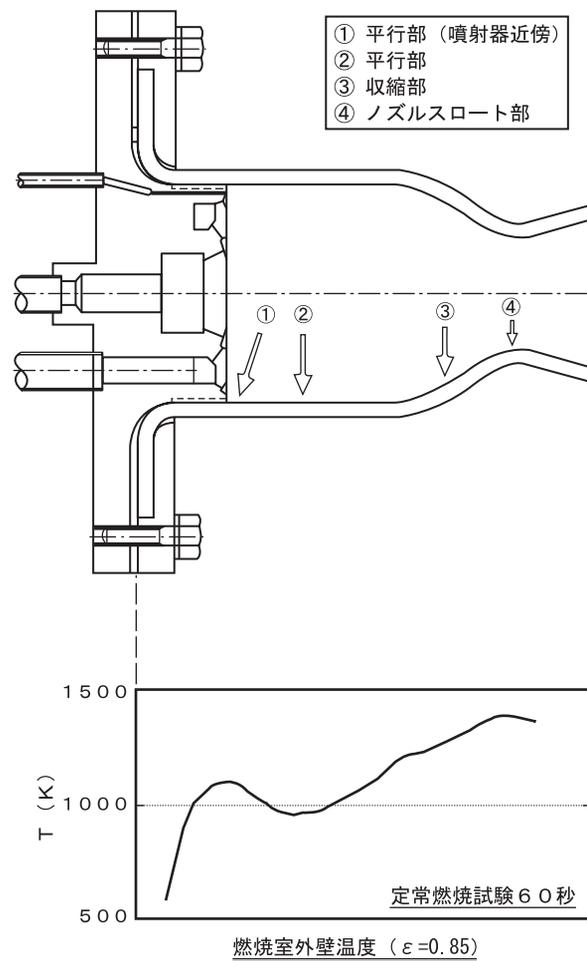


図14 内視鏡観察位置

秒定常試験時の中心軸上の外壁温度グラフを併せて示す。①、②は温度の低い平行部で③、④は温度の高い収縮部とノズルスロート部である。

図15の①噴射器近傍の平行部では、T/N5016後(累積サイクル数60回、累積燃焼時間525秒)まではヒートマークは見られるが、SiCの剥離は見られない。しかし、

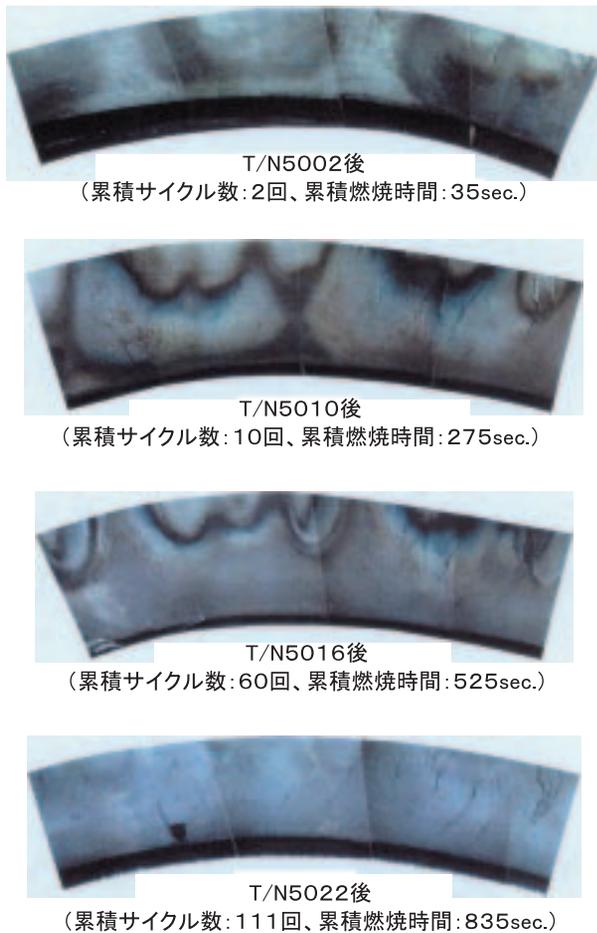


図15 ①平行部 (噴射器近傍)

T/N5022後 (累積サイクル数111回、累積燃焼時間835秒)には噴射器の近くに小さな($\phi 2\sim 3\text{mm}$) SiCの剥離が観察された。

図16の②平行部では、最初の30秒定常試験後に小さな($\phi 2\sim 3\text{mm}$) SiCの剥離が観察されたが、その後の観察では若干の剥離面積の拡大は見られるもののC/C材の侵食の進行は見られない。

図17の③収縮部では、T/N5010後 (累積サイクル数10回、累積燃焼時間275秒)にSiCの剥離が観察された。剥離部の周囲には、横方向(周方向)に微細なクラックが見られる。その後の5秒ON/6秒周期のパルスモード試験では剥離面積が拡大し、C/C材の侵食の進行も観察された。

図18の④ノズルスロット部では、T/N5007 (累積サイクル数7回、累積燃焼時間185秒)後にSiCの剥離が観察された。その後、T/N5012後 (累積サイクル数20回、累積燃焼時間325秒)までは、剥離の拡大は見られなかったが、剥離部周囲の微細なクラックの増加が見られる。その後のパルスモード試験の繰り返しにより③の収縮部と同様に剥離面積の拡大及びC/C材の侵食の進行が観察された。

内視鏡観察結果をもとに作成した、損傷箇所の展開図を図19に示す。図中の黒ヌリ部が損傷箇所を示す。

T/N5010後 (累積サイクル数10回、累積燃焼時間275秒)では、小さなSiCの剥離が熱負荷の高いノズルスロ

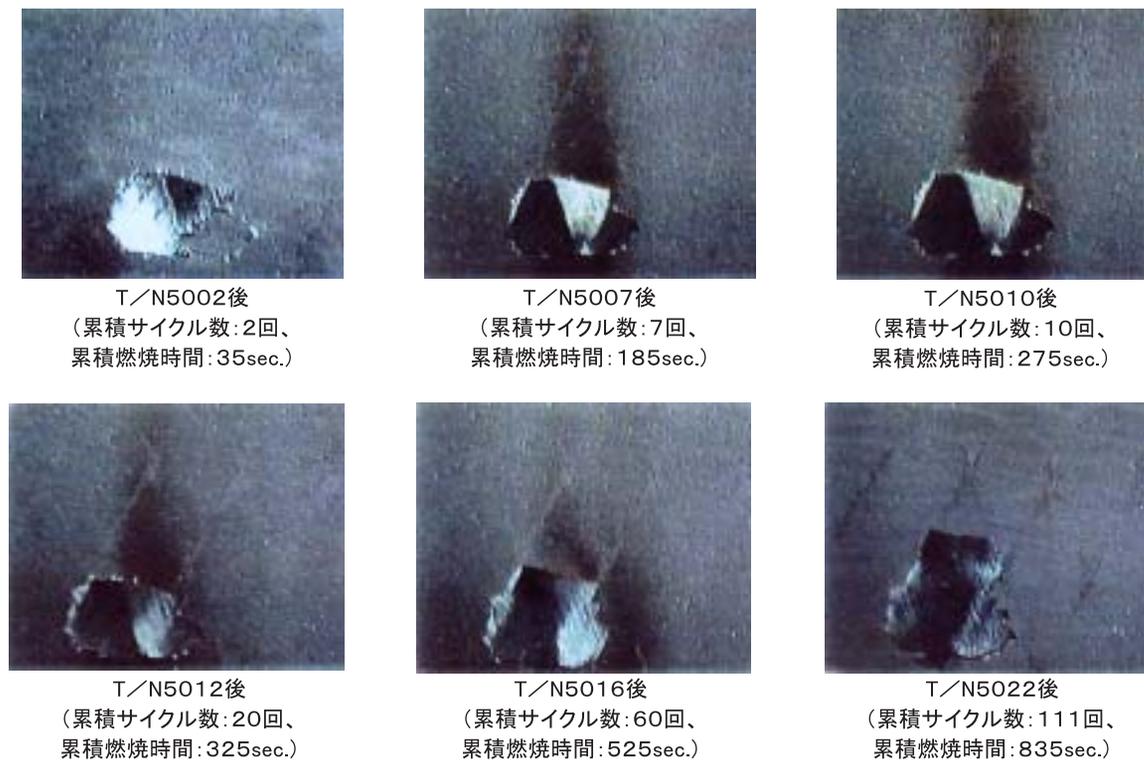


図16 ②平行部



T/N5002後
(累積サイクル数:2回、
累積燃焼時間:35sec.)



T/N5007後
(累積サイクル数:7回、
累積燃焼時間:185sec.)



T/N5010後
(累積サイクル数:10回、
累積燃焼時間:275sec.)



T/N5012後
(累積サイクル数:20回、
累積燃焼時間:325sec.)



T/N5016後
(累積サイクル数:60回、
累積燃焼時間:525sec.)



T/N5022後
(累積サイクル数:111回、
累積燃焼時間:835sec.)

図17 ③収縮部



T/N5002後
(累積サイクル数:2回、
累積燃焼時間:35sec.)



T/N5007後
(累積サイクル数:7回、
累積燃焼時間:185sec.)



T/N5010後
(累積サイクル数:10回、
累積燃焼時間:275sec.)



T/N5012後
(累積サイクル数:20回、
累積燃焼時間:325sec.)



T/N5016後
(累積サイクル数:60回、
累積燃焼時間:525sec.)



T/N5022後
(累積サイクル数:111回、
累積燃焼時間:835sec.)

図18 ④ノズルスロート部

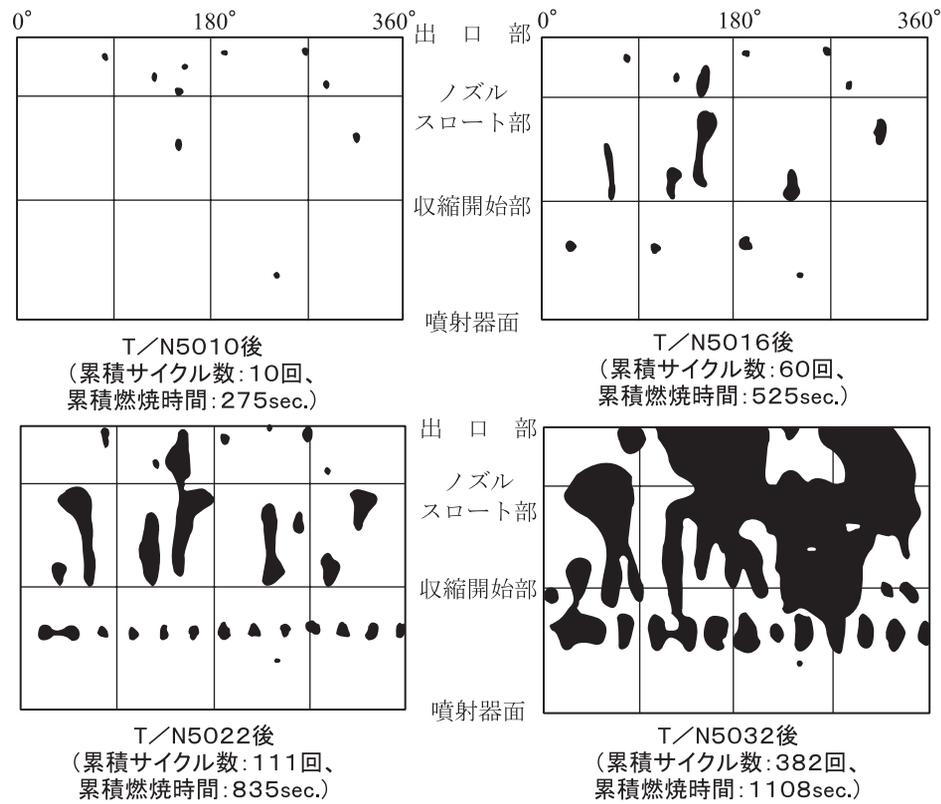


図 19 損傷箇所展開図

ート部周辺に8箇所と平行部に1箇所観察された。T/N5016後(累積サイクル数60回、累積燃焼時間525秒)では、収縮部及び平行部において新たなSiCの剥離が観察された。また、収縮開始部からノズルスロート部にかけての高温部では、燃焼ガスの流れの方向に剥離侵食が拡大している。T/N5022(累積サイクル数111回、累積燃焼時間835秒)では、高温部での剥離侵食が燃焼ガス

の流れの方向にさらに拡大していること、また、比較的低温である平行部の周方向に、ほぼ等間隔なSiCの剥離が観察された。試験終了後(累積サイクル数382回、累積燃焼時間1108秒)では、剥離侵食は燃焼室内面の全体に拡大していた。燃焼室外壁においても試験開始当初からノズルスロート部周辺に数箇所のSiCの剥離が観察され、燃焼時間の増加とともにC/C材の侵食が進行し、ノ

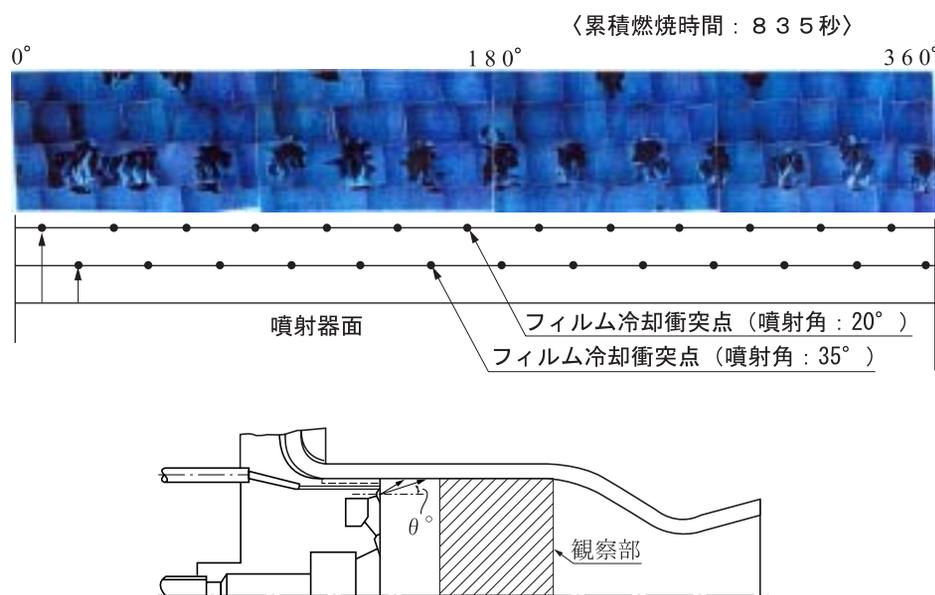


図 20 損傷箇所とフィルム冷却衝突点

ズルスロート直上流部、角度 50° の位置で内外壁の損傷部が貫通した。

T/N5022後(累積サイクル数111回、累積燃焼時間835秒)に比較的低温である平行部において、周方向にほぼ等間隔なSiCの剥離が観察された。剥離部周方向の展開写真を図20に示す。燃焼試験に用いた噴射器は、フィルム冷却オリフィスが噴射角 20° と 35° が交互に26個配置されている。図の●はフィルム冷却オリフィス噴射角度から計算で求めたフィルム冷却剤(MMH)が燃焼室内壁へ衝突する点を示す。図からSiCの剥離は噴射角 35° の位置に対応して発生していることが判る。

4.3.2.3 X線 CT 検査

X線 CTによる断層検査は、燃焼室をテストスタンドから取り外して行うこと、また、検査には長時間を要するため試験前、試験終了後を含め計7回実施した。燃焼室平行部において、周方向にほぼ等間隔なSiCの剥離が観察されたT/N5022後(累積サイクル数111回、累積燃焼時間835秒)の検査結果を図21に示す。図にはフィルム冷却オリフィスの配置も示しているが、前述した内視鏡による観察結果と同様に噴射角 35° の位置に対応してSiCの剥離が発生していることが判る。

X線 CT検査結果をもとに燃焼室内外壁からの損傷深さ dt (最深部、ノズルスロート上流部)をサイクル数でまとめたグラフを図22に示す。●で示す燃焼室内壁の損傷は、5秒ON/6秒周期のパルスモード試験では、サイクル数に対しほぼ直線的に増加している。1秒ON/2秒

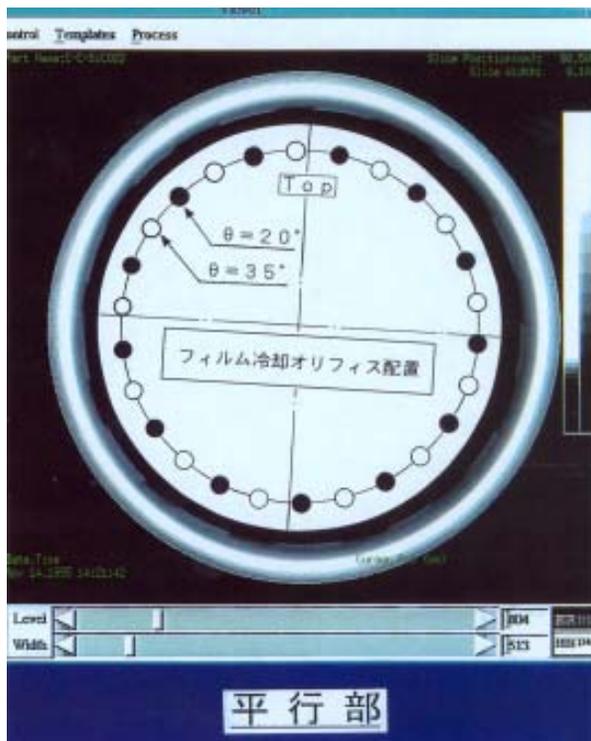


図21 T/N 5022後のX線CT画像

周期のパルスモード試験でも、サイクル数に対しほぼ直線的に増加しているが、その傾きは5秒ON/6秒周期のパルスモード試験に比べ小さい傾向を示している。■で示した燃焼室外壁は、内壁と同様の傾向を示しているが、1秒ON/2秒周期のパルスモード試験の傾きは、内壁よりかなり小さな傾きとなっている。

次に、損傷深さ(dt)を累積燃焼時間でまとめたグラフを図23に示す。●で示す燃焼室内壁、■で示す燃焼室外壁とも、若干のバラツキは見られるが、ほぼ直線的に増加する傾向を示している。

4.3.3 SiC耐酸化コーティング層剥離の原因推定

前述の各観察と検査結果より、早期(累積サイクル数10回、累積燃焼時間275秒)に発生した小さなSiCの剥離が熱負荷の高いノズルスロート部周辺に多く発生したことからフィルム冷却剤の蒸発により局所的な高温部の発生がSiC層剥離の原因と考えられる。しかし、比較的低温の低い平行部でも1箇所発生したこと、また燃焼ガスに晒されていない燃焼室外壁でも剥離が発生していることから、燃焼室形状による繊維配向の相違(熱膨張率の面内方向の異方性)、製作時の部分的なコーティング

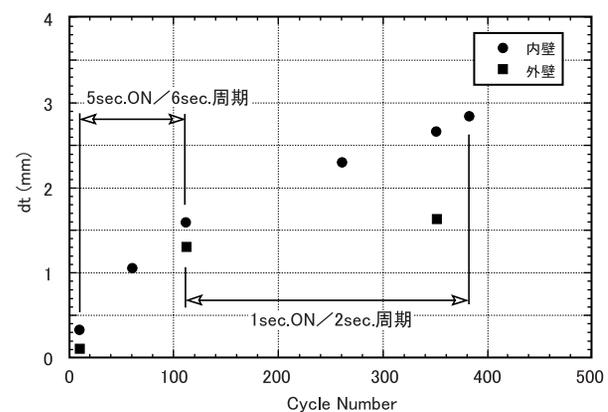


図22 サイクル数に対する損傷深さ

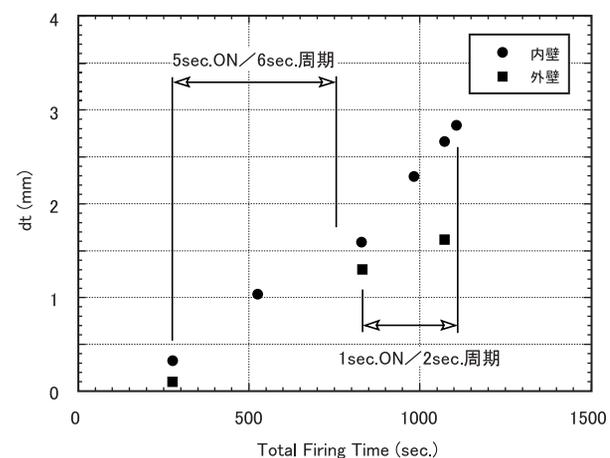


図23 累積燃焼時間に対する損傷深さ

層密着性の不良も考えられる。

T/N5022後（累積サイクル数111回，累積燃焼時間835秒）に平行部で観察された周方向にほぼ等間隔に発生したSiCの剥離は，フィルム冷却オリフィスと対応していることから，フィルム冷却により面内温度分布が発生したことによる熱応力破壊，またはパルスモード試験における常温のフィルム冷却剤が高温の内壁に繰り返し噴きつけられることによる熱衝撃破壊が剥離の原因と考えられる。

第5章 第二次試作燃焼室

5.1 燃焼室製作

一次試作の海面高度用燃焼室を用いた試験では，燃焼室内壁の耐酸化コーティング層であるSiCが比較的早い時期に剥離が生じ侵食が進む結果となった。そこで本燃焼室の製作に当たっては，

- (1) 一次試作燃焼室の試験結果から，SiC耐酸化コーティング層の剥離発生の原因を特定して対策を施し，更に耐久性の向上を図る。
- (2) 実機形状では $\varepsilon = 100$ であることから，本燃焼室ではその前段階として $\varepsilon = 30$ で製作し，高膨張化にともなう成形技術（寸法精度向上）を確立する。

以上の二つを目的とし製作することとした。

5.1.1 SiC耐酸化コーティング層の剥離対策

4章の3.3項で述べたように，SiC耐酸化コーティング層の剥離発生のメカニズムとしては，幾つかの原因の複合により誘発することが判った。著者らはこのなかで

- (1) 燃焼室形状による繊維配向角の相違（熱膨張率の面内方向の異方性）。
- (2) 燃焼室形状による部分的な密着性の不良。

この2つがSiC耐酸化コーティング層の剥離発生の主要因と考え，これに対して対策を施し製作することにした。

(1)の対策として，一次試作燃焼室で採用した二次元バイアス織物に代って二次元朱子織物を採用することとした。

二次元バイアス織物は，形状追随性に優れているため燃焼室のような複雑形状のものに対して成形しやすい利点があった。しかし部所（収縮部等）によっては，繊維配向角及び繊維体積含有率が変化してしまうと考えられたため，高膨張で製作する本燃焼室では得られる成形体は良好なものではないと判断し，これに代って成形しやすい点では二次元バイアス織物には若干劣るものの，繊維配向角及び繊維体積含有率の均一性の点で優れている二次元朱子織物を採用し，熱膨張率の面内方向の異方性緩和を狙った。二次元バイアス織物と二次元朱子織物の織り方を図24に示す。

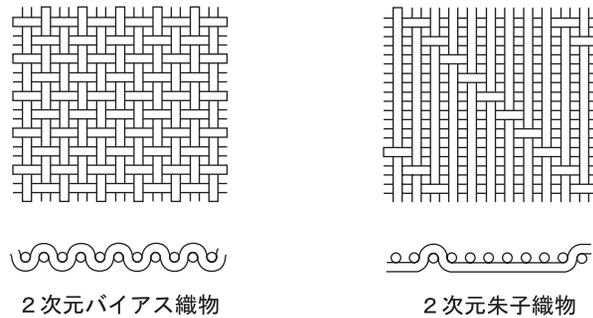


図24 二次元バイアス、朱子織物の織り方

表6 SiC耐酸化コーティング層のはく離対策

原因	対策
(1)燃焼室形状による繊維配向の相違 (熱膨張率の面内方向の異方性)	炭素繊維の変更 (二次元バイアス織物→二次元朱子織物)
(2)燃焼室形状による部分的な密着性の不良	<ul style="list-style-type: none"> ・FGMコーティング層の厚さの変更 ($30\mu\text{m} \rightarrow 40\mu\text{m}$) ・SiC耐酸化コーティング層のSiCの結晶性の変更 (合成温度を一次試作燃焼室の製作時より高温化)

(2)の対策として，熱応力緩和（FGM）層を $30\mu\text{m}$ から $40\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ 厚くすると共に，耐酸化コーティングとしてSiC-CVDコーティング層 $100\mu\text{m}$ を形成する際の合成温度を一次試作燃焼室の製作時より100K高くしてSiCの結晶性を変え，コーティングの密着性の向上を図ることとした。原因に対する対策をまとめたものを表6に示す。

5.1.2 高膨張化にともなう製作技術の確立

二次試作燃焼室の製作工程を図25に，完成した二次試作燃焼室外観と燃焼室形状を図26と図27に示す。高膨張化に伴い製作する燃焼室は大型となり，CFRPの成形時に一次燃焼室で採用していた一軸方向プレスでは，シリコンゴム型を通じて燃焼室全体に等方加圧するため，特にスロート部付近の成形圧力不足及び樹脂だまり発生が考えられ，これにより寸法精度が大幅に低下することが予想される。これに対する方策として，本試作ではこの成形法に変わり，燃焼室を真空バッグに封入しガス圧による等方向加圧に変更した。燃焼室の設計値に対する製作後の実測値を表7に示す。表より，最大の誤差で1mmであり特に重要な部所であるスロート部では設計値 30.6mm に対して実測値 29.8mm （平均値）となり設計値に対してほぼ満足できる寸法精度が得られた。燃焼室厚さは $\varepsilon = 30$ であることから，機械的強度を考慮して一次試作よりも厚い平均で 8.4mm とした。

表 7 二次試作燃焼室の寸法測定結果

測定箇所 (mm)	フランジ部外径	平行部内径	フランジ部 - スロート部長さ	収縮部長さ	フランジ部 - ノズル出口長さ	スロート径	ノズル出口径
設計値	120.0	57.0	100.0	34.5	246.2	30.6	166.7
製作後実測値	120.4	56.5	99.0	35.0	246.0	29.8	166.2

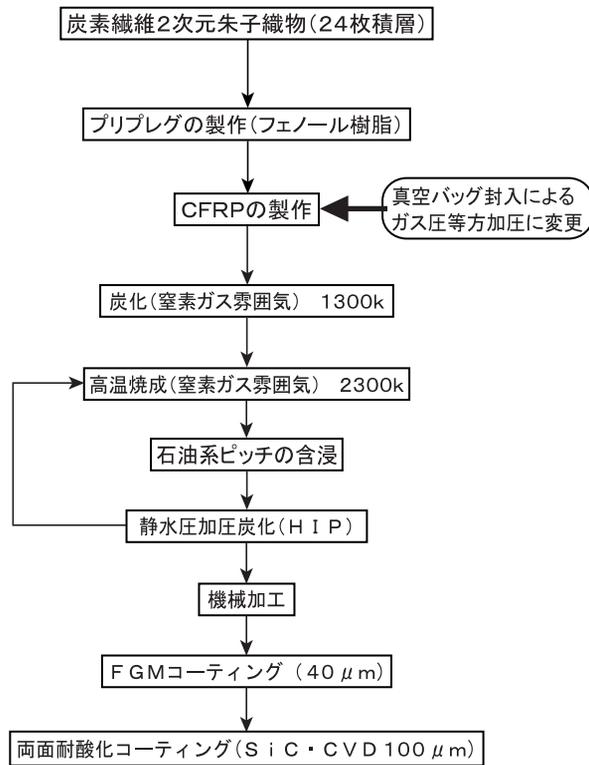


図 25 二次試作燃焼室製作工程



図 26 二次試作燃焼室外観

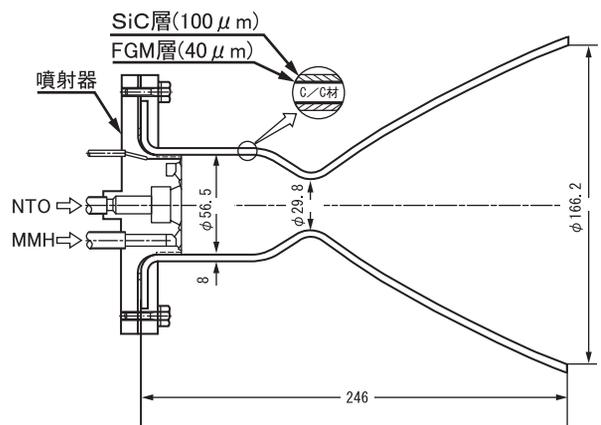


図 27 二次試作燃焼室形状

5.2 試験方法及び試験条件

試験は、一次試作の燃焼試験で用いた推進薬供給装置を使用し、試験条件も一次試作の燃焼室試験と同じ燃焼圧 1MPa、混合比 1.65 一定とした。

目標とする RCS スラスタの要求仕様は 2 章 2.1 項で述べたが、主にヨースラスタとして作動し 2 基搭載される予定である。ここでスラスタの必要インパルスは

$$2.84 \times 10^5 \text{ (N} \cdot \text{s)}$$

必要インパルスをヨースラスタ 2 基の定常燃焼 (連続作動) で発生させた場合の 1 基当りの連続作動時間は以下のように算出される。

$$2.84 \times 10^5 / 1200 / 2 = 119 \text{ sec.}$$

また、ヨースラスタ 2 基の最小作動時間 (0.05 秒) で発生させた場合の 1 基当りのパルス数は

$$2.84 \times 10^5 / (1200 \times 240 / 311 \times 0.05) / 2 = 3057 \text{ パルス}$$

式中の 240 はパルスモードの比推力, 311 は定常燃焼時の比推力である。

以上の計算結果からスラスタの必要寿命として 20% 上乗せした以下の値を試験の目標に設定した。

定常燃焼時間 : 150sec.

作動総パルス数 : 3600 パルス

燃焼試験は、上記の必要寿命を目標に、海面高度及び高空環境下で実施した。試験内容としては、スラスタ性能を確認するための定常燃焼試験と、耐久性を確認するためのパルスモード燃焼試験を実施した。RCS スラスタは主にパルスモード (最小 0.05 秒) で使用される。しかし試験設備の制約から最小パルスモード試験ができないため、できるだけ実用に近い三つのモード (1 秒 ON/2 秒周期, 0.5 秒 ON/1.5 秒周期, 0.5 秒 ON/1 秒周期) で、30 及び 100 サイクルのパルスモード燃焼試験を実施した。試験は燃焼室より燃焼ガスの漏洩等の不具合が生じた場合を除き、目標とした 3600 回に至るまで実施することとした。

5.3 試験結果

5.3.1 高空性能確認試験

性能確認のための定常燃焼試験は、当研究室のロケット高空性能試験設備を用いて高空環境下（667Pa 以下）で実施した。本燃焼室は $\varepsilon = 30$ であることから設備の一部であるディフューザを最適化するために新たに設計製作し試験を実施した。試験は、30 秒×2 回、100 秒×4 回、1 秒 ON/2 秒周期×15 回を 1 回の計 7 回実施した。燃焼室を低圧室スタンドにセットアップした状態および高空性能確認試験 100 秒の時の試験状況を図 28 と図 29 に示す。

100 秒の試験で得られた性能 I_{spv} （真空比推力）と予測性能計算結果を図 30 に示す。

I_{spv} は次式で算出した。

$$I_{spv} \text{ (sec.)} = F_v / W_t$$

ここで F_v は真空推力、 W_t は推進薬の全質量流量である。

図の黒丸は試験で得られた結果で、予測性能カーブ（ $\varepsilon = 30$ の値）とほぼ同等の値を示している。このことから実際の形状である $\varepsilon = 100$ においても目標仕様である比推力 311 秒を達成できる可能性が得られた。

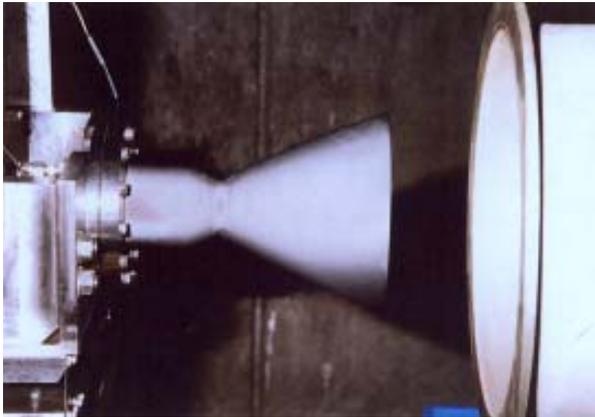


図 28 低圧室スタンドセットアップ

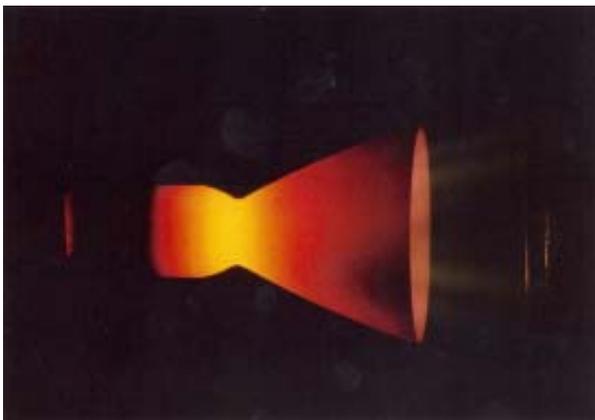


図 29 高空性能確認試験（100 秒燃焼）

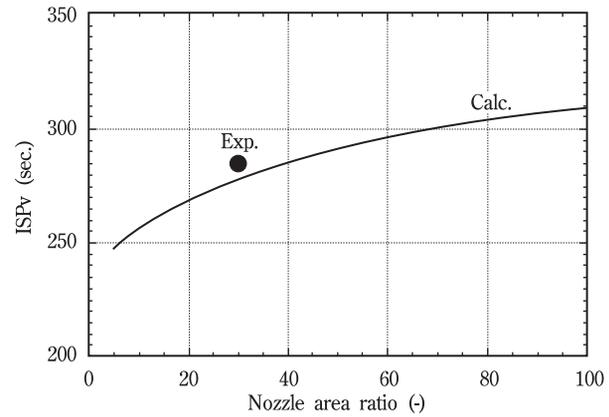


図 30 高空性能確認試験結果

5.3.2 耐久性評価試験

試験は累積燃焼時間3450秒、目標とした累積サイクル数3600回を達成したため終了とした。試験内容の経緯を表 8 に示す。

耐久性評価のためのデータとしては、一次試作の燃焼室を用いた評価と同様に、燃焼中の燃焼室外壁温度は放射温度計を用いて監視すると共に、燃焼室内壁の剥離発生及び侵食の進行状況を内視鏡により毎回試験後に実施した。また、定期的に新たに導入したレーザ形状測定装置を用いて燃焼室内壁全面の損傷マップの作成と X 線 CT 装置による燃焼室の断層検査を実施し、内視鏡による観察結果と比較するとともに断層データから損傷深さを測定した。

5.3.2.1 燃焼室外壁温度

高空試験 100 秒の試験で得られた最も熱的に厳しいスロート部外壁温度の時間履歴を図 31 に示す。温度は約 1250K でほぼ定常になっているのが判る。この結果から 150 秒の燃焼においても同程度の温度であると推測される。この温度から一次元熱伝導解析で求めた内壁温度は約 1800K であった。

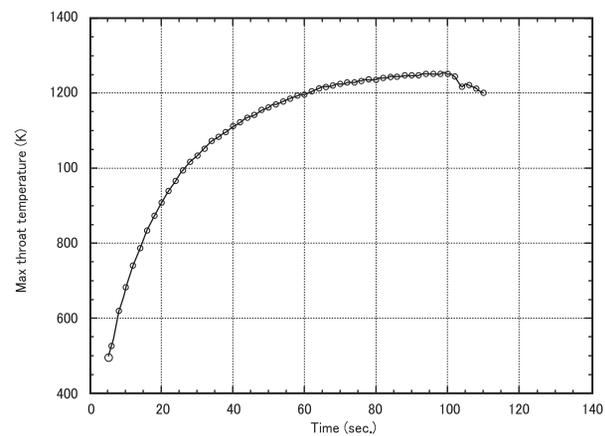


図 31 スロート部外壁温度

表8 二次燃焼室試験経緯 (1/3)

試験番号	定常燃焼 (sec.)	パルス燃焼	サイクル (回)	累積サイクル数 (回)	累積燃焼時間 (sec.)
7001	5		1	1	5
7002	10		1	2	15
7003	30		1	3	45
7004 H	30		1	4	75
7005 H	30		1	5	105
7006 H		1sec.ON/2sec. 周期	15	20	120
7007		1sec.ON/2sec. 周期	30	50	150
7008		1sec.ON/2sec. 周期	30	80	180
7009		1sec.ON/2sec. 周期	30	110	210
7010		1sec.ON/2sec. 周期	30	140	240
7011	100		1	141	340
7012		1sec.ON/2sec. 周期	30	171	370
7013	200		1	172	570
7014	200		1	173	770
7015	10		1	174	780
7016	100		1	175	880
7017	100		1	176	980
7018	100		1	177	1080
7019	5		1	178	1085
7020	100		1	179	1185
7021	5		1	180	1190
7022 H	100		1	181	1290
7023 H	100		1	182	1390
7024 H	100		1	183	1490
7025		1sec.ON/2sec. 周期	30	213	1520
7026		1sec.ON/2sec. 周期	30	243	1550
7027		1sec.ON/2sec. 周期	30	273	1580
7028		1sec.ON/2sec. 周期	30	303	1610
7029		1sec.ON/2sec. 周期	30	333	1640
7030		1sec.ON/2sec. 周期	30	363	1670
7031		1sec.ON/2sec. 周期	30	393	1700

表 8 二次燃焼室試験経緯 (2/3)

試験番号	定常燃焼 (sec.)	パルス燃焼	サイクル (回)	累積サイクル数 (回)	累積燃焼時間 (sec.)
7032		1sec.ON/2sec.周期	30	423	1730
7033		1sec.ON/2sec.周期	30	453	1760
7034		1sec.ON/2sec.周期	30	483	1790
7035		1sec.ON/2sec.周期	30	513	1820
7036		1sec.ON/2sec.周期	30	543	1850
7037		1sec.ON/2sec.周期	30	573	1880
7038		1sec.ON/2sec.周期	30	603	1910
7039		1sec.ON/2sec.周期	30	633	1940
7040		1sec.ON/2sec.周期	30	663	1970
7041		1sec.ON/2sec.周期	30	693	2000
7042		500msec.ON/1.5sec.周期	100	793	2050
7043		500msec.ON/1.5sec.周期	100	893	2100
7044		500msec.ON/1.5sec.周期	100	993	2150
7045		500msec.ON/1sec.周期	100	1093	2200
7046		500msec.ON/1sec.周期	100	1193	2250
7047		500msec.ON/1sec.周期	100	1293	2300
7048		500msec.ON/1sec.周期	100	1393	2350
7049		500msec.ON/1sec.周期	100	1493	2400
7050		500msec.ON/1sec.周期	100	1593	2450
7051		500msec.ON/1sec.周期	100	1693	2500
7052		500msec.ON/1sec.周期	100	1793	2550
7053		500msec.ON/1sec.周期	100	1893	2600
7054		500msec.ON/1sec.周期	100	1993	2650
7055		500msec.ON/1sec.周期	100	2093	2700
7056		500msec.ON/1sec.周期	100	2193	2750
7057		500msec.ON/1sec.周期	100	2293	2800
7058		500msec.ON/1sec.周期	100	2393	2850
7059		500msec.ON/1sec.周期	100	2493	2900
7060		500msec.ON/1sec.周期	100	2593	2950
7061		500msec.ON/1sec.周期	100	2693	3000
7062		500msec.ON/1sec.周期	100	2793	3050

表 8 二次燃焼室試験経緯 (3/3)

試験番号	定常燃焼 (sec.)	パルス燃焼	サイクル (回)	累積サイクル数 (回)	累積燃焼時間 (sec.)
7063		500msec.ON/1sec. 周期	100	2893	3100
7064		500msec.ON/1sec. 周期	100	2993	3150
7065		500msec.ON/1sec. 周期	107	3100	3200
7066		500msec.ON/1sec. 周期	100	3200	3250
7067		500msec.ON/1sec. 周期	100	3300	3300
7068		500msec.ON/1sec. 周期	100	3400	3350
7069		500msec.ON/1sec. 周期	100	3500	3400
7070		500msec.ON/1sec. 周期	100	3600	3450

* 試験番号 H は高空環境による試験, その他は海面高度試験。

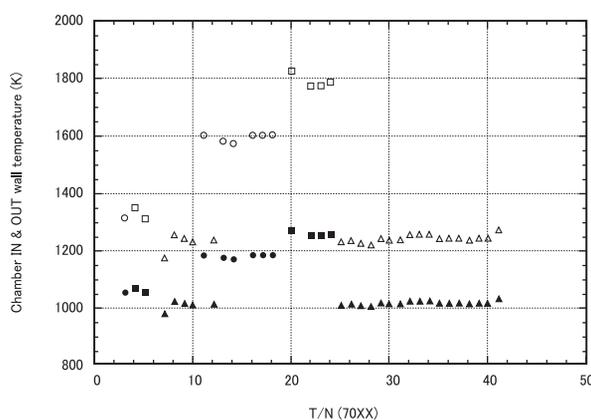


図 32 燃焼室内外壁温度

試験番号と燃焼室外壁の最高温度および計算で求めた燃焼室内壁温度をまとめたものを図32に示す。図中の▲印は1秒ON/2秒周期のパルスモード, ●印は海面高度, ■印は高空試験の結果で, それぞれの白抜きは一次元熱伝導解析で求めた内壁温度を示す。一次試作で行った海面高度30秒の試験では, 燃焼室外壁温度が約1300Kであったのに対して, 同条件で行った今回の試験では1050K (▲印) と低い値を示している。これは, 高膨張化にともない強度的に安全率を高くするために, 肉厚を一次試作燃焼室よりも2倍程度厚くしたための影響である。また, 海面高度 (●印) と高空環境下 (■印) で行った100秒の試験では, 約50K程度高空環境下の方が高い値を示している。これは高空環境下では対流による冷却効果が無いためである。

5.3.2.2 内視鏡・レーザ形状測定装置観察

内視鏡による燃焼室内壁の観察は, 燃焼室がセットされているスタンドから取り外すことなく毎回試験後に行った。観察法としては一次試作と同様に, 内視鏡の回転

及び移動距離データを制御装置に入力してプログラム制御で行い同一箇所での剥離発生と侵食の進行状況を観察した。一次試作では内壁全面について観察を実施したが, 今回はインジェクタ面からスロート部よりノズル出口50mmのところまで観察した。

レーザ形状測定装置による燃焼室内壁の観察は, 燃焼室をスタンドから取り外し制御装置を用いて移動距離データを入力してプログラム制御で行い, 得られたデータをパソコンで画像処理し損傷マップを作成した。

T/N7041 (累積サイクル数693回, 累積燃焼時間2000秒) までのスロート部 (260°) 位置の観察結果を図33に示す。T/N7018 (累積サイクル数177回, 累積燃焼時間1080秒) まではヒートマークが僅かに見られるがSiCの剥離は見られない。しかし1秒ON/2秒周期で30サイクル行ったT/N7033 (累積サイクル数453回, 累積燃焼時間1760秒) 後の検査で, φ5mm程度のSiCの剥離が発生した。他の平行部, 収縮部ではSiCの剥離は見られず健全であった。これが最初に確認したSiCの剥離であり, この時点で一次試作燃焼室の剥離発生時期と比較するとサイクル数で226倍, 燃焼時間では50倍程度の耐久性向上が得られた。0.5秒ON/1.5秒周期で100サイクル行ったT/N7042 (累積サイクル数793回, 累積燃焼時間2050秒) 後の観察では, 収縮部の240°と270°の2箇所φ1mm程度のSiCの剥離が観察された。その後同じ条件で2回行ったT/N7044 (累積サイクル数993回, 累積燃焼時間2150秒) 後の観察では, 新たに平行部と収縮開始部に1箇所φ3mm程度のSiCの剥離が観察された。試験条件を0.5秒ON/1秒周期で100サイクルに変えて行った試験T/N7045 (累積サイクル数1093回, 累積燃焼時間2200秒) 後には, 平行部 (90°) (150°), 収縮開始部 (135°), 収縮部 (75°) (120°), スロート部

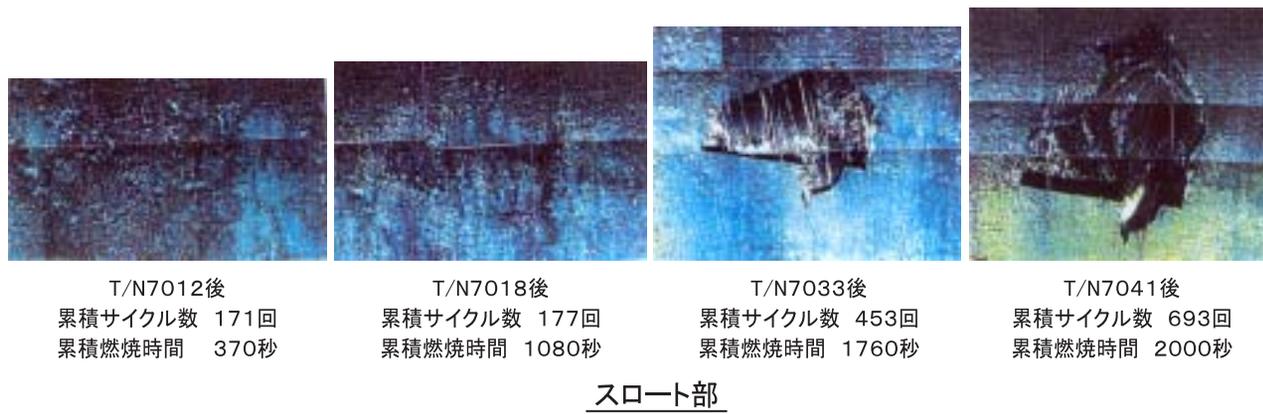


図33 スロート部観察結果（内視鏡）

(90°)にSiCの剥離が観察された。このようにSiCの剥離が多く発生した原因としては、T/N7025からT/N7041までの1秒ON/2秒周期で30サイクルの条件では、前述のようにスロート部に1箇所のSiCの剥離しか観察されていないことから、ON/OFF時間及び一回の試験で行うサイクル数の影響が考えられる。その後の試験では、回数を重ねるごとに一次試作で見られたように収縮開始部からスロート部周辺にかけて燃焼ガスの流れの方向にSiCの剥離箇所も徐々に拡大しC/C材への侵食も進行していくのが観察された。T/N7058(累積サイクル数2393回、累積燃焼時間2850秒)後の観察では、スロート部のほぼ全周にわたりSiCの剥離が観察された。T/N7070(累積サイクル数3600回、累積燃焼時間3450秒)後にレーザー形状測定装置を用いて作成した燃焼室内壁の展開図と一次試作燃焼室のT/N5032(累積サイクル数382回、累積燃焼時間1108秒)後の展開図を図34に示す。今までは、内視鏡によるデータをもとに手書きで展開図を作成していたため、非常に労力と時間のかかる

作業であったが、レーザー形状測定装置を用いる事で、短時間でデータが得られるため損傷評価の効率化と精度向上が図られた。図より、二次試作でも一次試作で見られるように周方向に等間隔(フィルム冷却オリフィス噴射角35°に対応)のSiCの剥離が見られるが、一部SiCの剥離侵食の少ない箇所及びSiCの剥離が無い箇所が見られる。原因として噴射器のフィルム冷却オリフィス孔の詰まりが考えられたため、試験後に噴射器流し試験を行った。その結果フィルム冷却オリフィスに詰りは無かったことから製作時におけるSiCの密着性不均一の影響と考えられる。

噴射器近傍においては、T/N7070(累積サイクル数3600回、累積燃焼時間3450秒)まで、噴射器のコアエレメント(燃料/酸化剤噴射オリフィスの組み合わせ)に対応していると思われるヒートマークは見られたがSiCの剥離は無かった。

5.3.2.3 X線CT検査

X線CTによる断層検査は、試験前も含めて3回検査

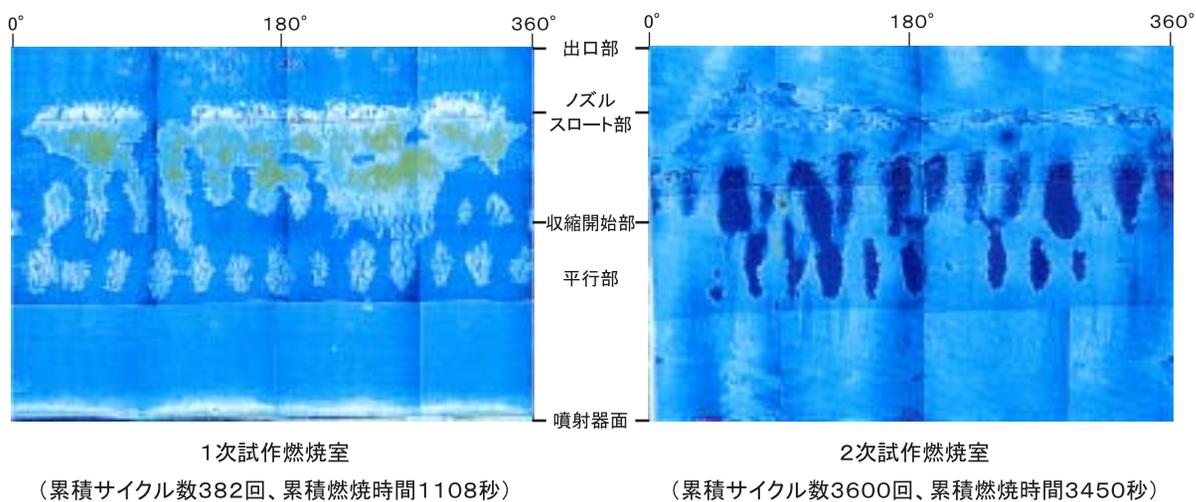


図34 燃焼室内壁展開図（レーザー形状測定装置）

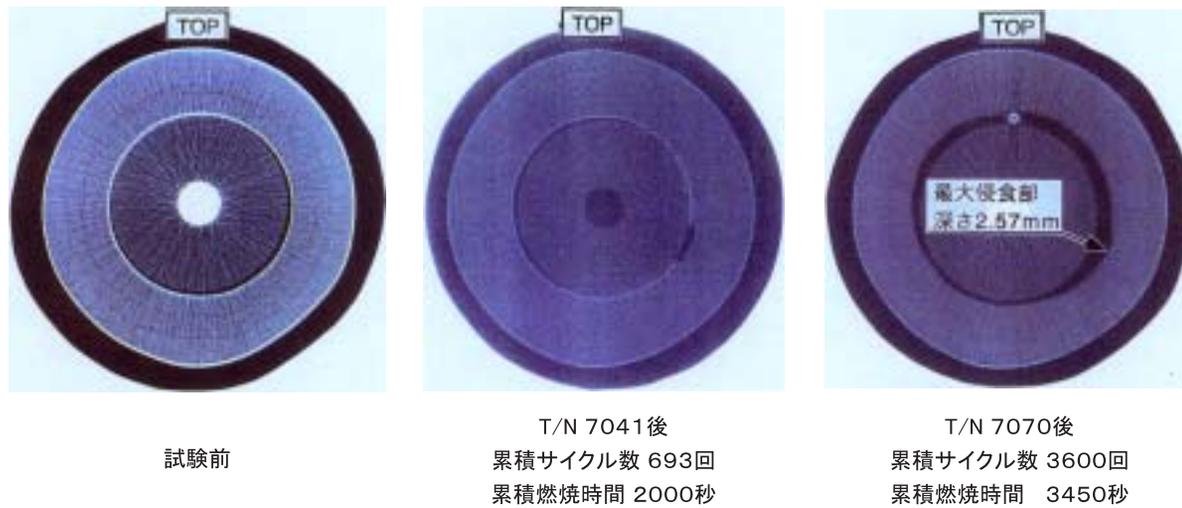


図 35 スロート部断層画像 (X線CT)

を実施した。初期にSiCの剥離が観察されたスロート部の断層画像を試験前のも含めて図35に示す。断層画像は、ノズル出口から見たもので、T/N7041（累積サイクル数693回、累積燃焼時間2000秒）の画像では、100°の位置（内視鏡で観察した260°に対応）にSiCの剥離が見られる。T/N7070（累積サイクル数3600回、累積燃焼時間3450秒）の画像では、内視鏡観察で述べたようにスロート部のほぼ全周にわたりSiCの剥離が見られ、最大侵食深さは100°の位置で2.57mmであった。

断層画像から侵食深さの進行状況をまとめたものを一次試作の結果と合わせて図36に示す。初期のSiCの剥離は一次試作に比べ大幅に向上しているのが判る。また、1秒ON/2秒周期の試験は0.5秒ON/1秒周期及び0.5秒ON/1.5秒周期の試験に比べ侵食の進行が早いことから燃焼時間の影響と思われる。

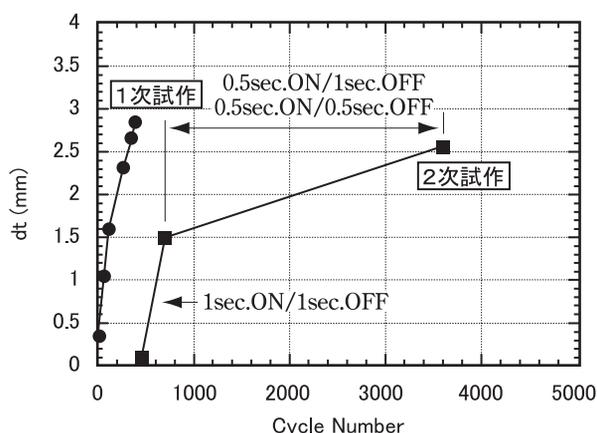


図 36 サイクル数と侵食深さの関係

第 6 章 第三次試作燃焼室

6.1 燃焼室材選定

二次試作燃焼室は、初期のSiCの剥離が一次試作燃焼室に比べ大幅に向上した。また目標とした3600回の繰り返し耐久性試験を達成し実用化の可能性が得られた。しかし、HOPE-X, XAのRCSスラスタの仕様及び構成の見直しの検討がありその結果、推力においては1200Nから600Nへ変更、またスラスタの作動回数も20500回の要求が出された。その後幾つかの見直しがあったものの、いずれにしてもスラスタの作動回数は10000回以上の要求が見込まれる可能性が高く、更に耐久性が必要となる。

一次、二次試作燃焼試験の結果から判ることは、SiCの剥離が発生すればその後の繰り返し試験を重ねることによって、剥離箇所の拡大とC/C材の侵食の進行が見られたことである。つまり、SiCの剥離を如何に抑えることが出来るかによってC/C材を適用した燃焼室の長寿命につながる事が判る。そこで三次試作燃焼室では、SiCの剥離を抑えるべく検討した材料で試験片レベルによるエロージョン試験を行うこととした。

6.1.1 エロージョン試験

試験片としては、比較のために二次試作燃焼室と同様に製作したものと、剥離を抑えるために2種類のセラミックポリマーを採用し、SiCとの密着性の向上と耐酸化性の効果を狙った。処理法は、C/C材にポリマーを真空含浸後アルゴンガス中で1773Kで熱処理して無機化させた。製作した3種類の構造を以下に示す。

試験片1: C/C (朱子織物積層材) + FGM + SiC (二次試作燃焼室対応)

試験片 2: C/C (朱子織物積層材) + SiNBC ポリマー + FGM + SiC

試験片 3: C/C (朱子織物積層材) + SiC ポリマー + FGM + SiC

試験は、岐阜県にある超高温材料研究センター (JUTEM) 内にあるエロージョン試験機を用い、アーク加熱により高温、高速の模擬空気流 ($N_2:O_2=4:1$) を発生させ気流中に置いた試験片の表面損傷の状態を評価することとした。試験片の形状は30mm□で厚さは2~3 mmとした。試験条件は、試験片の表面温度を1773Kになるように設定し、温度の保持時間は1回10分の繰り返しでチャンパー内圧力は80Paで行った。

評価項目としては、試験片の外観目視観察と板厚変化及び質量変化とし、毎回試験後に実施した。板厚測定はマイクロメータで各9箇所測定し平均値を板厚とした。試験は試験片のSiCコーティング層に剥離等の損傷が発生するまで行った。

各試験後の厚さ測定の結果において、試験回数の増加とともに減少する傾向がみられ最大で2%程度の減少であった。またSiCの表面にピットが発生していた。これは常圧下における静的な試験と異なり、減圧下における動的なエロージョン試験特有のものであり、SiC自体が損耗していることによるものと思われる。またSiC表面のピットを除いた試験片の損傷は全て端部を中心に発生していた。試験回数と質量変化をまとめたものを図37に示す。SiNBC及びSiCポリマーを使用したものは、二次試作燃焼室対応のものに比べ耐久性が向上しており、特にSiCポリマーを使用したものは8回まで剥離は発生しておらず、耐久性において優れている結果が得られた。この結果から、三次試作燃焼室はSiCポリマーを採用して製作することとした。

6.1.2 燃焼室製作

製作工程を図38に示す。ピッチ緻密化工程の後にSiCポリマー緻密化工程を新たに加えた。燃焼室形状は、二

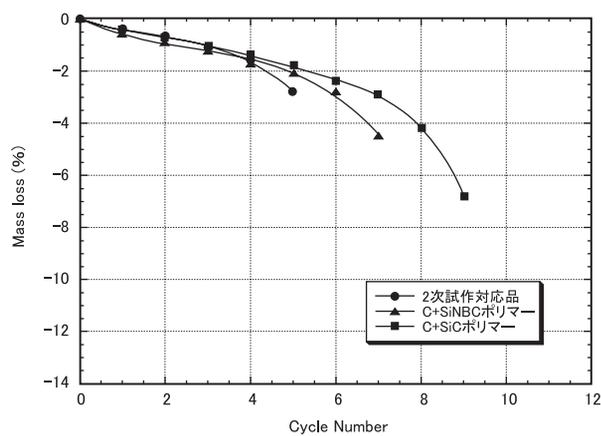


図37 エロージョン試験結果

次試作燃焼室の試験において定常燃焼時の性能を取得しているため今回は耐久性の確認を主とし $\varepsilon=7$ とした。燃焼室断面の模式図を図39にまた完成した燃焼室外観と形状を図40、図41に示す。

6.2 試験方法及び試験条件

試験は、燃焼室の耐久性確認のためパルスモードのみ

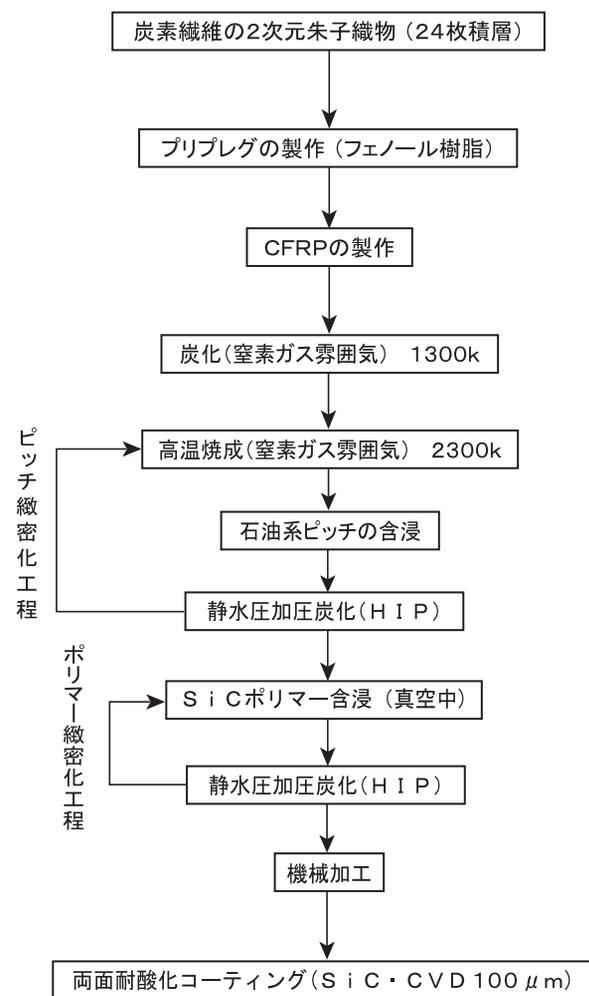


図38 三次試作燃焼室製作工程

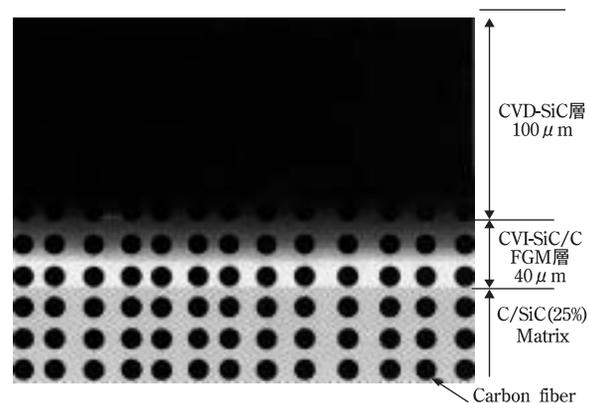


図39 三次試作燃焼室断面模式図



図 40 三次試作燃焼室外観

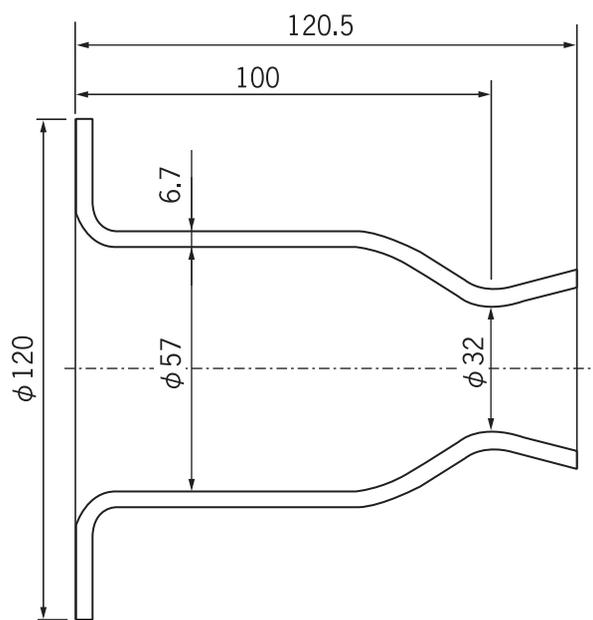


図 41 三次試作燃焼室形状

とし、海面高度で行った。一次、二次試作燃焼室で用いた同じ推進薬供給装置を使用し、今回からの試験では、実用に近いパルスモード試験を行うために燃料/酸化剤用高応答バルブと制御装置を製作し用いた。高応答バルブの外観を図 42 に示す。材質は SUS 製で作動電圧 DC24V、最高使用圧力 3MPa、最高応答時間 0.05 秒、最大の繰り返し数は、1 回の試験で 1000 回まで可能である。制御装置の外観を図 43 に示す。パネコン、開閉スイッチ群、シーケンスと試験現場に設置した中継ボックスで構成した。左側パネコンには、推進薬供給系グラフィ



図 42 高応答バルブ外観

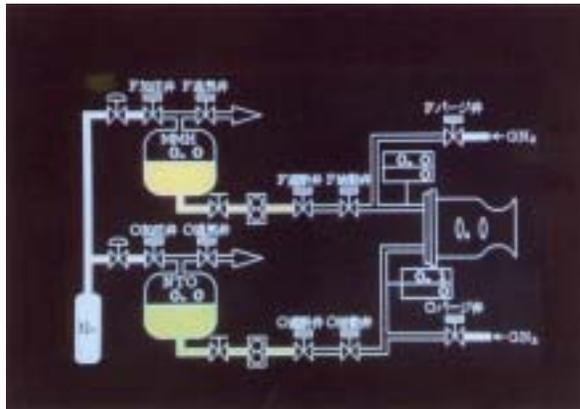


図 43 製作した HOPE 制御装置外観

ックを表示し試験前タンク加圧時の圧力及び試験時の各部圧力、温度をモニタできるようにした。右側パネコンには、推力と低圧室圧のモニタ部、RCS/OMS（軌道変換用エンジン用）と S.L（海面高度試験）/A.L（高空試験）切り替えスイッチ及び試験番号部、試験回数と燃焼時間及び停止時間の設定部、手動/自動と単独/連動及び点火スイッチとブザーリセット部と画面を 4 系統に分割した。RCS/OMS 及び S.L/A.L スイッチは、画面上で押すことによってあらかじめ作成したシーケンスに自動的に切り替わるように設計した。また、試験回数と燃焼時間及び停止時間は、画面上で任意に設定が可能とした。両パネコン画面を図 44 に示す。

試験は点火スイッチを押すことによりシーケンスがスタートし、設定してあるインターロック項目（燃焼圧、インジェクタ温度等）で異常が生じたときは、直ちに非常停止シーケンスに移行するようにし、つねに安全サイドで試験が行えるように設計した。

試験条件は、一次、二次試作燃焼室と同じ燃焼圧 1MPa、混合比 1.65 とし、高応答バルブは基本的に 0.05 秒の ON/OFF の作動が可能であるが、本試験では 0.1 秒



左側画面



右側画面

図44 HOPE制御装置のパネコン画面

ON/0.6秒周期とし一回の試験で行う繰り返し回数は100, 200, 300回に設定した。試験は燃焼室より燃焼ガスの漏洩等の不具合が生じた場合を除き貫通に至るまで実施することとした。

6.3 試験結果

6.3.1 耐久性評価試験

試験は、表9に示す経緯で行い累積サイクル数7465回、累積燃焼時間746.5秒でスロート上流250°の箇所において貫通したため試験を終了とした。

耐久性評価のためのデータとしては、一次、二次試作の燃焼室を用いた評価法と同様に行ったのでここでは省略する。

6.3.1.1 燃焼室外壁温度

T/N9024 (0.1秒ON/0.6秒周期×300回)の試験での各外壁温度の時間履歴を図45に180秒での外壁温度分布を図46に示す。どの測定箇所においても繰り返し数200回(120秒)付近で温度はほぼ定常になっており、最も高い温度を示したスロート上流部で1080Kであった。

燃焼室外壁温度、燃焼圧とサイクル数の履歴をまとめたものを図47に示す。5100回までの試験では各外壁温

度が徐々に低下しているのが判る。この原因としては試験を重ねるに従って、スロート付近の剥離、侵食が拡大したことによりスロート径が徐々に大きくなり、これによって燃焼圧が低下し外壁温度も低下したと思われる。これに対して5100回以降の試験では、徐々に温度が増加する傾向がみられるが、これはSiCの剥離、侵食がさらに進み肉厚が薄くなった影響で温度が徐々に上昇したと考えられる。

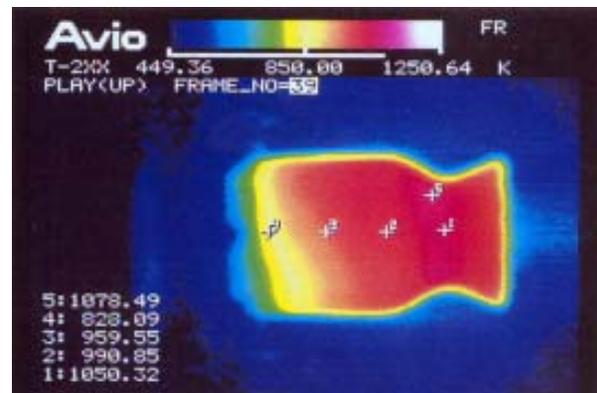


図46 外壁温度分布(放射温度計)

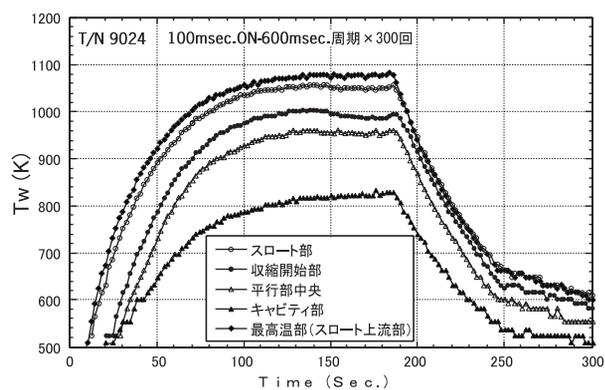


図45 外壁温度時間履歴

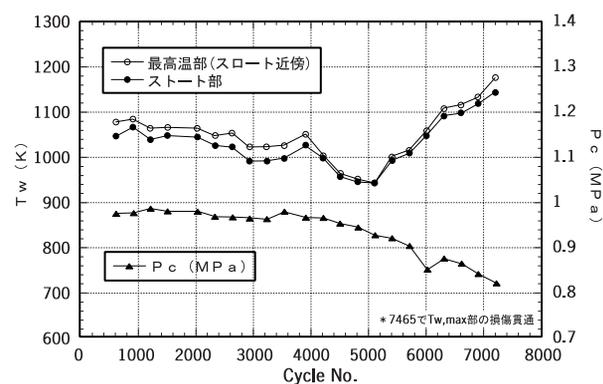


図47 燃焼室外壁温度、燃焼圧対サイクル数

表 9 三次試作燃焼室試験経緯

試験番号	パルス燃焼	サイクル (回)	累積サイクル数 (回)	累積燃焼時間 (sec.)
9022	100msec.ON/600msec. 周期	100	100	10
9023	100msec.ON/600msec. 周期	200	300	30
9024	100msec.ON/600msec. 周期	300	600	60
9025	100msec.ON/600msec. 周期	300	900	90
9026	F 始動弁閉異常で非常停止			
9027	100msec.ON/600msec. 周期	300	1200	120
9028	100msec.ON/600msec. 周期	300	1500	150
9029	100msec.ON/600msec. 周期	220	1720	172
9030	100msec.ON/600msec. 周期	300	2020	202
9031	100msec.ON/600msec. 周期	300	2320	232
9032	100msec.ON/600msec. 周期	300	2620	262
9033	100msec.ON/600msec. 周期	300	2920	292
9034	100msec.ON/600msec. 周期	300	3220	322
9035	100msec.ON/600msec. 周期	380	3600	360
9036	100msec.ON/600msec. 周期	300	3900	390
9037	100msec.ON/600msec. 周期	300	4200	420
9038	100msec.ON/600msec. 周期	300	4500	450
9039	100msec.ON/600msec. 周期	300	4800	480
9040	100msec.ON/600msec. 周期	300	5100	510
9041	100msec.ON/600msec. 周期	300	5400	540
9042	100msec.ON/600msec. 周期	300	5700	570
9043	100msec.ON/600msec. 周期	300	6000	600
9044	100msec.ON/600msec. 周期	300	6300	630
9045	100msec.ON/600msec. 周期	300	6600	660
9046	100msec.ON/600msec. 周期	300	6900	690
9047	100msec.ON/600msec. 周期	300	7200	720
9048	100msec.ON/600msec. 周期	265	7465	746.5

6.3.1.2 内視鏡・レーザ形状測定装置観察

燃焼室内視鏡観察位置を示したものを図48に示す。試験前の平行部④ (215°～), ⑤ (215°～), ⑥ (300°), 収縮部⑨ (45°), スロート部 (16°～) の観察結果を図49に示す。T/N9023 (累積サイクル数300回, 累積燃焼時間30秒) 後の観察では, 噴射器直近 (180°) にフィルムクーリングによると思われるヒートマーク及び収縮部からスロート部にかけて13箇所のヒートマークが明確に見られたがSiCの剥離は無かった。T/N9026の試験は燃料側の始動弁が作動不良となったため6サイクル目で非常停止としたが, その後の観察で, 平行部中央 (220°) と収縮部 (300°) にφ1～2mm程度のSiCの剥離が観察された。その後の試験を重ねて行った時の平行部③～

④ (90°～, 215°～), 収縮部⑧～⑩ (215°～), 収縮部⑩ (0°～360°) の剥離の拡大, 侵食の進行の様子をとらえた観察結果を図50～53に示す。

レーザ形状測定装置で観察したT/N9029 (1720回), T/N9031 (2320回), T/N9032 (2620回), T/N9035 (3600回), T/N9043 (6000回), T/N9048 (7465回) 後の結果を図54～59に示す。図の上方がノズル出口側で, 下

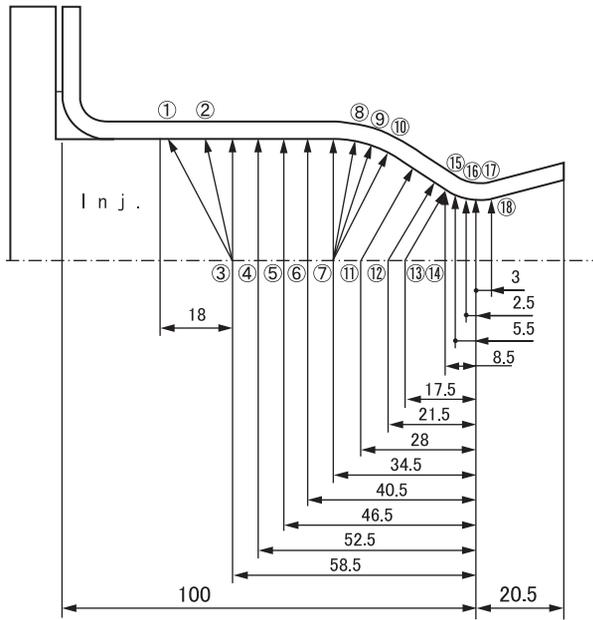


図48 内視鏡観察位置

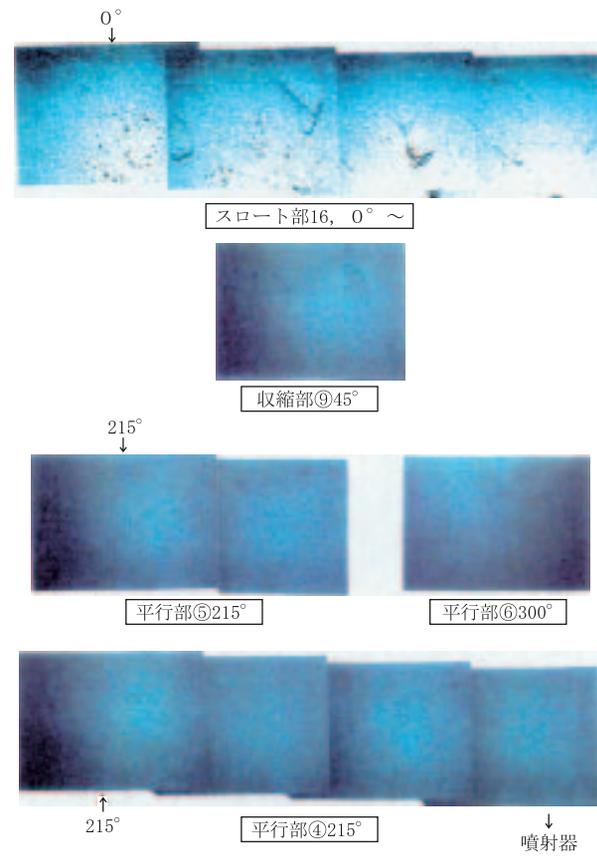


図49 試験前観察結果 (内視鏡)

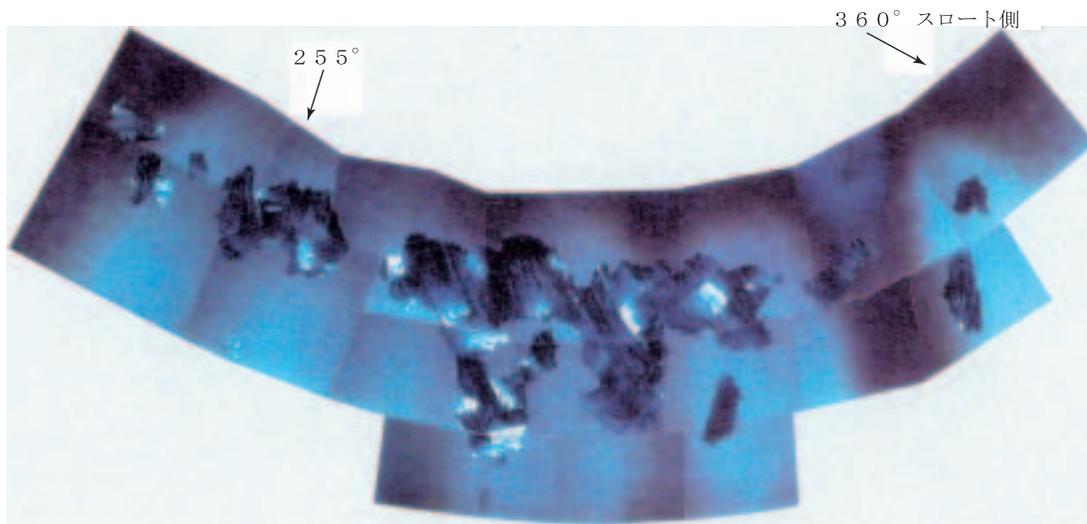
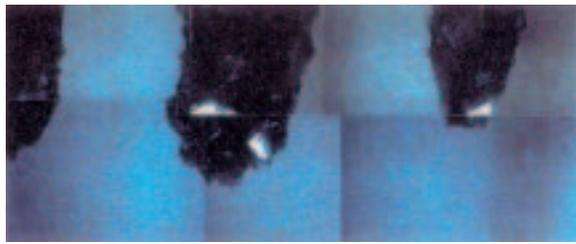
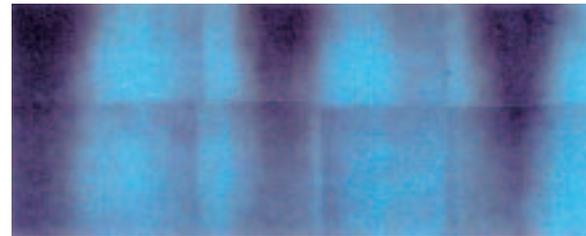


図50 剥離の拡大と侵食の進行の様子 (T/N9029後収縮部⑧～⑩ 215～360°)



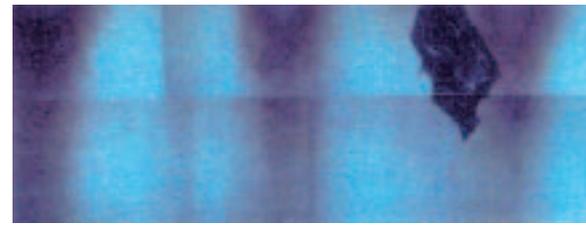
T/N9032後(2620回, 262sec.)



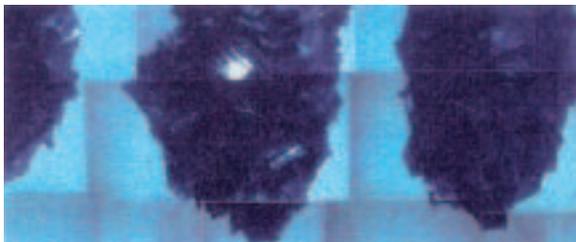
T/N9032後(2620回, 262sec.)



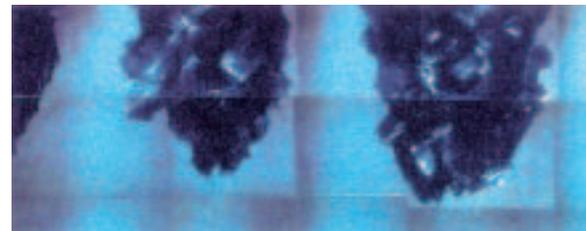
T/N9035後(3600回, 360sec.)



T/N9035後(3600回, 360sec.)



T/N9043後(6000回, 600sec.)



T/N9043後(6000回, 600sec.)

図 51 剥離の拡大と侵食の進行の様子
 (平行部③~④ 215° ~)

図 52 剥離の拡大と侵食の進行の様子
 (平行部③~④ 90° ~)

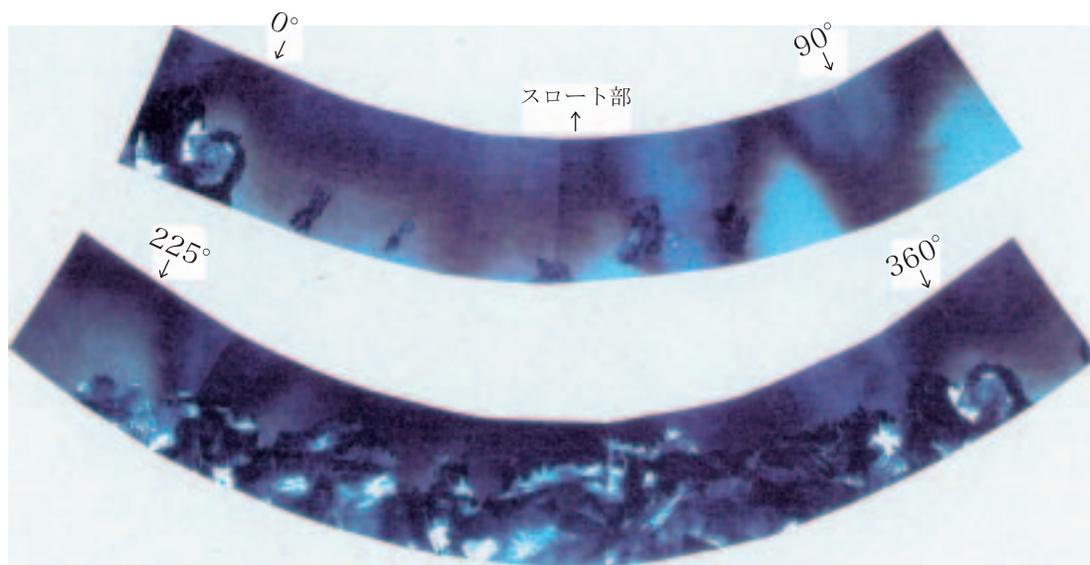


図 53 剥離の拡大と侵食の進行の様子
 (T/N9031 後収縮部⑩ 0 ~ 360°)

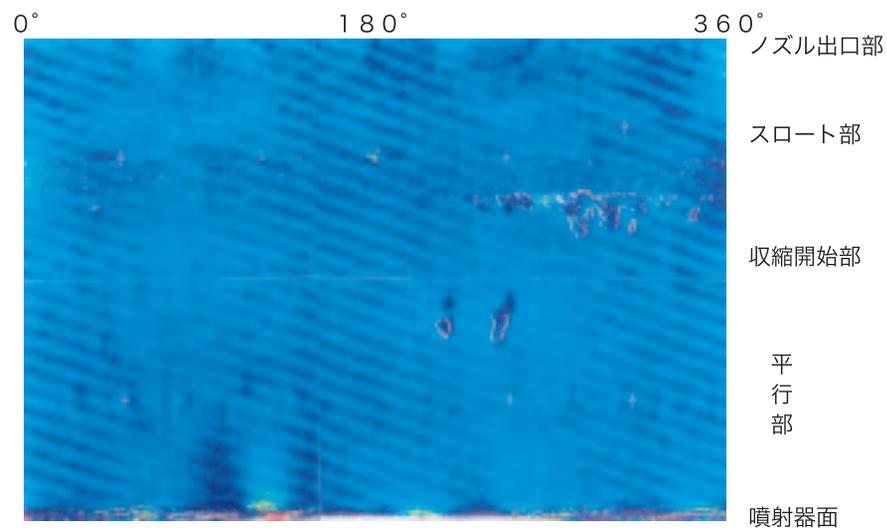


図 54 レーザ形状測定装置による観察結果 1 (T/N9029 後 1720 回)

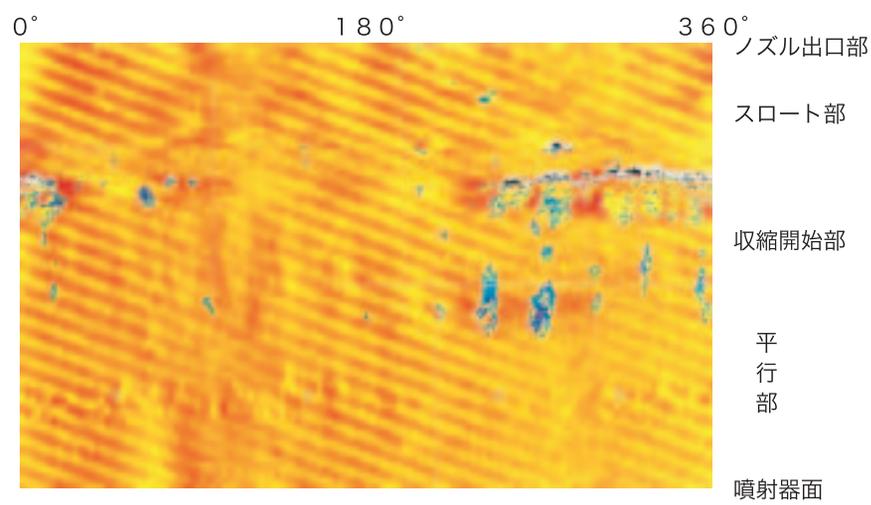


図 55 レーザ形状測定装置による観察結果 2 (T/N9031 後 2320 回)

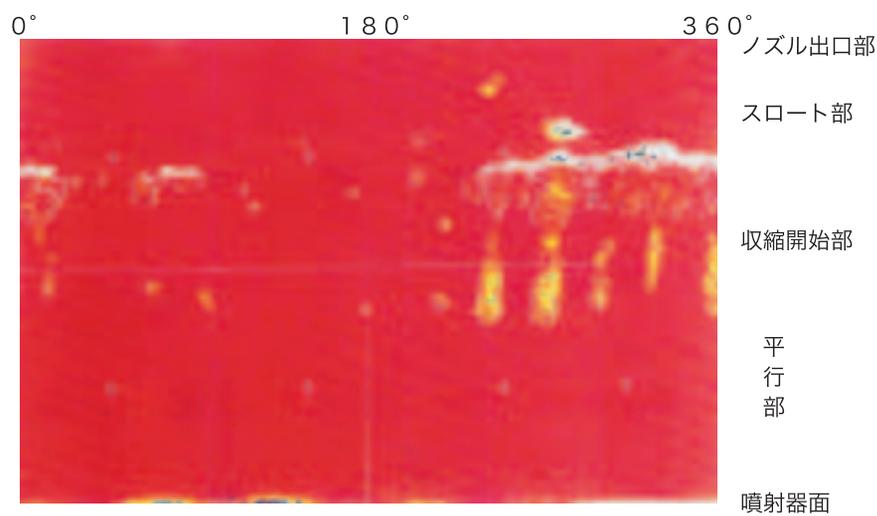


図 56 レーザ形状測定装置による観察結果 3 (T/N9032 後 2620 回)

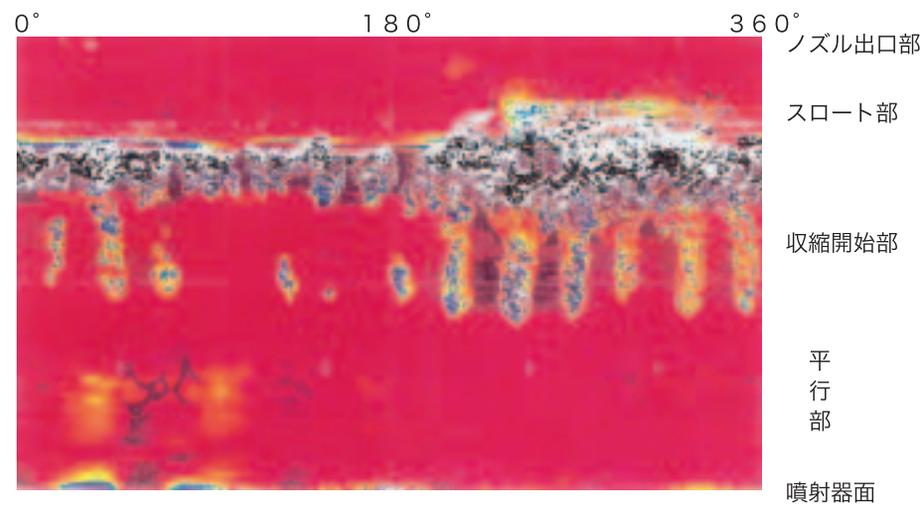


図 57 レーザ形状測定装置による観察結果 4 (T/N9035 後 3600 回)

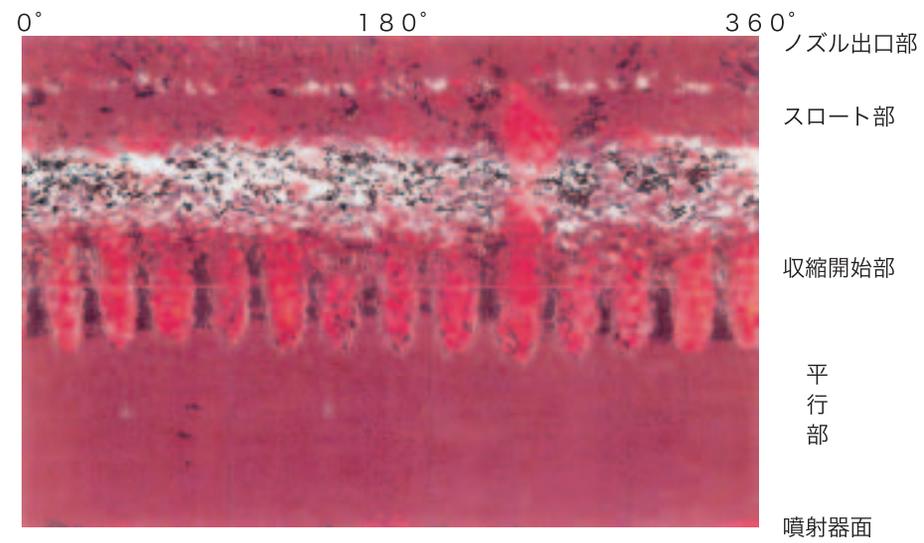


図 58 レーザ形状測定装置による観察結果 5 (T/N9043 後 6000 回)

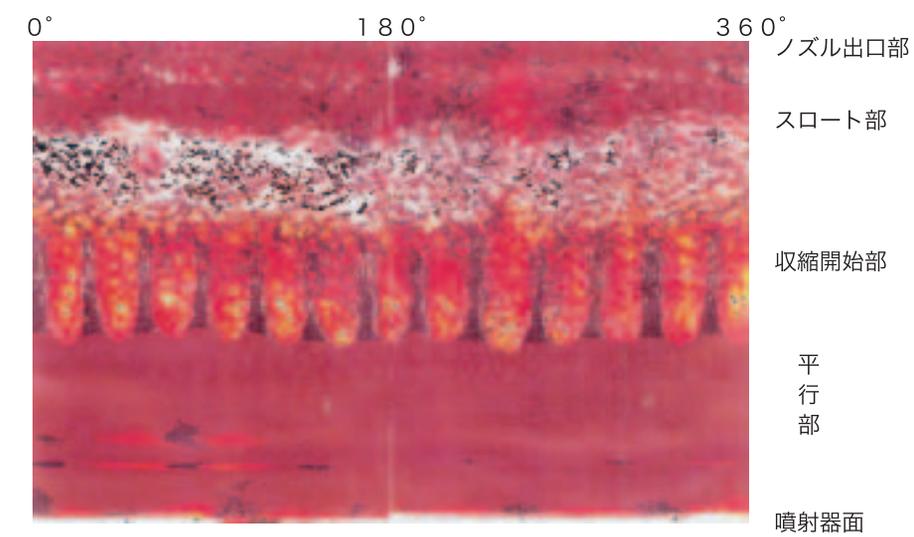


図 59 レーザ形状測定装置による観察結果 6 (T/N9048 後 7465 回)

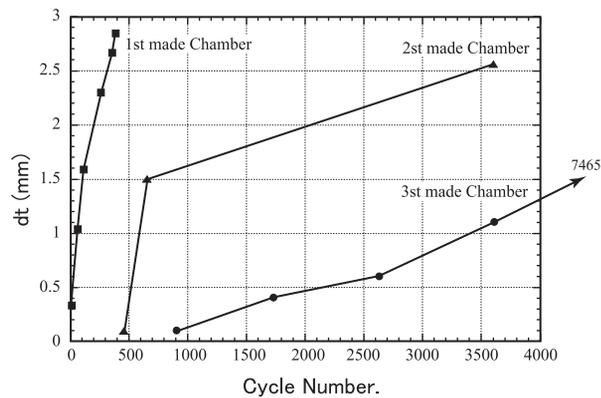


図60 剥離発生からの侵食の進行状況

方が噴射器側となる。T/N9032 (2620回) までは、全体的に180°～360°に剥離、損傷が多く発生しているのが見られ、その後の試験では一次、二次試作の試験で見られた様に等間隔に13箇所の剥離、侵食が見られた。

6.3.1.3 X線CT検査

X線CTによる断層観察は、試験前も含めて5回検査を実施した。断層画像から剥離発生と侵食の進行状況をまとめたものを一次、二次試作の結果と合わせて図60に示す。初期のSiCの剥離は900回後に確認され、一次、二次試作に比べ大幅に向上した。また、耐久性についても目標とした10000回までには至らなかったが、二次試作を上回る7465回の耐久性が確認できた。

第7章 まとめ

RCSスラスタへの適用を目指し、製作した3種類のC/C材燃焼室による燃焼試験の結果、以下のことが得られた。

- (1). C/C材燃焼室を用いれば、従来の金属燃焼室に比べ軽量化が可能である。
- (2). 性能 (I_{sp}) は、予測性能計算結果と同等の結果が得られた。また燃焼中の燃焼室スロート温度は、C/C材の耐熱性を考慮してもまだ余裕があることからフィルム冷却量の低減が可能であり、性能の向上が期待できる。
- (3). 2次試作燃焼室は、目標としたサイクル数である3600回を、また3次試作燃焼室では2次試作を上回る7465回を達成しC/C材燃焼室のRCS用スラスタへの適用の可能性が示された。
- (4). 内視鏡、レーザ形状測定装置、X線CTの非破壊検査で損傷データを取得することにより、燃焼室の寿命を予測できる可能性が得られた。

今後更に実用化に向けての課題として、金属(噴射器)とC/C材の接合技術が重要となるため検討を進めていきたい。

最後に、本研究はHOPE-Xに関するNAL/NASDA

共同チームの研究の一環として行なわれた。

謝辞

燃焼室の製作とエロージョン試験に当たっては、日石三菱中央研究所の早田喜穂氏、久手幸徳氏、木内規之氏、噴射器の設計・製作では梅田浄二氏又、X線CT検査においては、本所複合材構造研究室の杉本直氏、宮城県産業技術総合センターの千代窪毅氏の御協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

付録

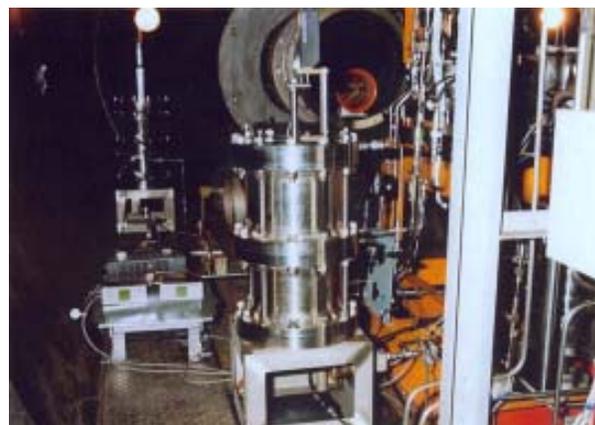
1 シリンダ式流量計

パルスモードによる試験で性能評価をおこなうには、短時間での少量の流量を精度良く測定する必要がある。従来、長秒時での性能評価に用いる流量計はタービン式が一般的であるが、パルス燃焼のような高応答性を要求される測定には問題がある。そこで本研究において、少ない流量を精度良く測定できるシリンダ式流量計を設計・製作した。

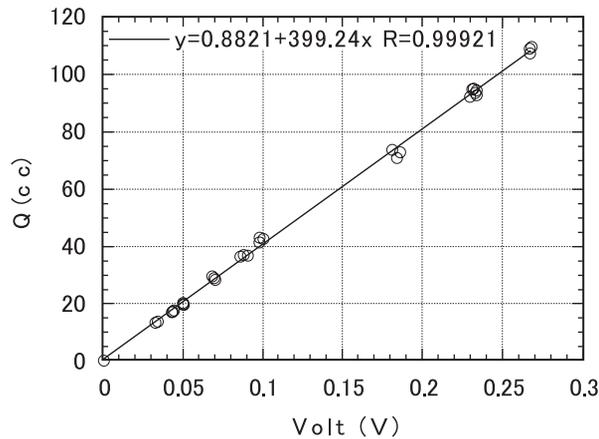
ここでは製作したシリンダ式流量計の概要と測定方法について述べる。付表1に仕様を、付図1にシリンダ式流量計をセットした状態を示した。シリンダ内部には一本の軸に2個のディスクが取り付けられ、下部の推進薬が上部の加圧ガス(GN2)部に入り込まない様な設計になっている。外部に突き出したシリンダの軸に水平板を取り付け、変位計の移動軸が直角に当たるように変位計を装着した。

付表1 シリンダ式流量計仕様

使用推進薬	NTO, MMH
容積	4000cm ³
供給量/移動量	40cm ³ /1mm
精度	±0.4cm ³



付図1 シリンダ式流量計セットアップ状況



付図2 実液流量校正結果

設計では 1 mm の移動距離で推進薬 40cc を供給できる。これは 0.2 秒のパルス燃焼時間に相当する。移動距離は変位計を用いて測定しており分解能は 0.01mm であるが実際に保証できるのは ± 0.4cc である。

付図 2 に実液での流量校正した結果を示した。変位と出力電圧はほぼ直線で表される。

2 600N スラスタのパルス作動燃焼性能

1200N スラスタに関する耐久性については、初期の目標を達成した。その成果を踏まえ、600 N スラスタ ($\epsilon = 44$) を製作し、パルス作動時の性能について評価を行った。但し、試験設備の始動弁を含む配管系は必ずしもパルス作動に対応できるようにはなっていないため、精度よい評価を行うためには始動弁の位置や配管系のボリューム等を考慮した設備が必要である。

2.1 試験概要

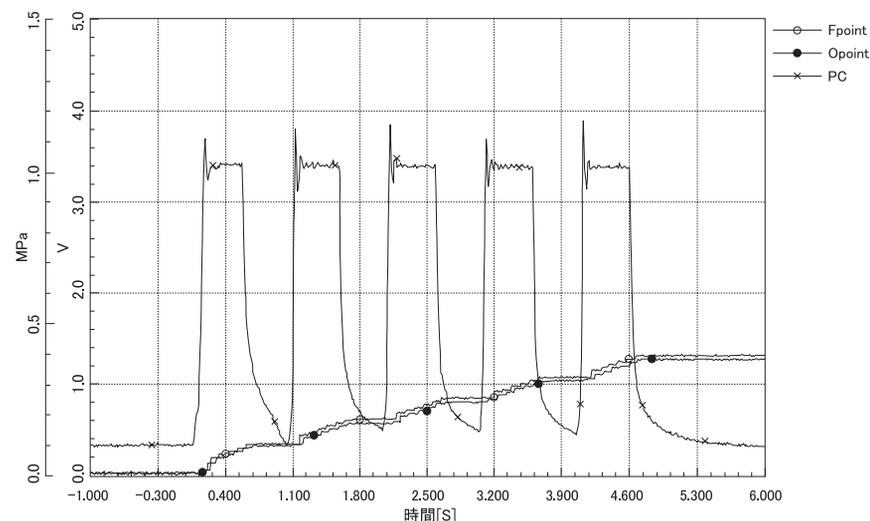
試験には 600N 級スラスタを用い、連続燃焼は高空環

付表 2 600N 燃焼室試験内容

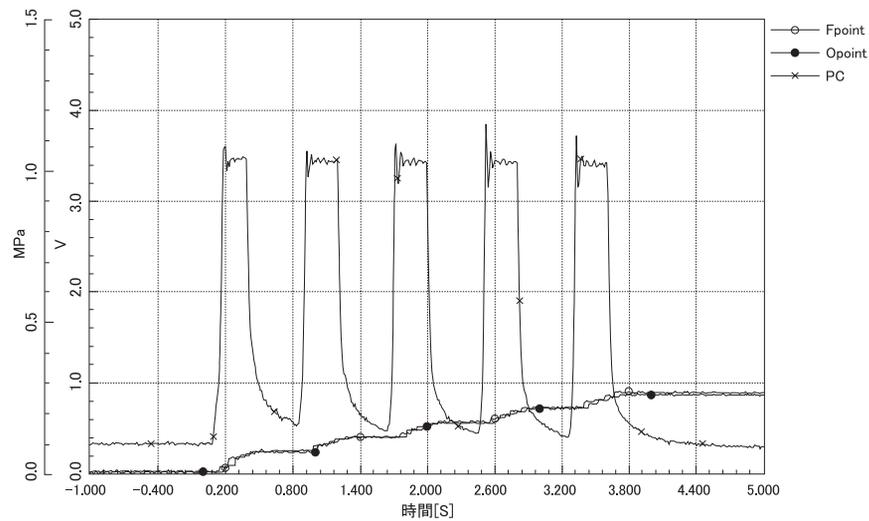
試験番号	パルス燃焼	サイクル数 (回)	燃焼時間 (秒)
3026	100msec.ON/600msec. 周期	50	5
3029	高空定常燃焼試験 60sec.	1	60
3032	100msec.ON/600msec. 周期	100	10
3033	200msec.ON/600msec. 周期	100	20
3034	200msec.ON/600msec. 周期	100	20
3035	200msec.ON/600msec. 周期	100	20
3036	100msec.ON/600msec. 周期	100	10
3037	100msec.ON/600msec. 周期	100	10

境下で、パルスモード燃焼は大気圧環境下で行った。試験内容を付表 2 に示す。

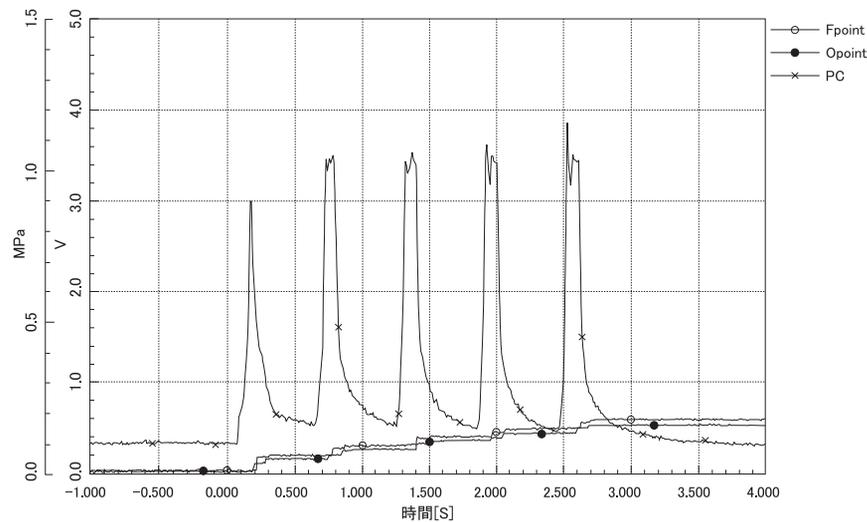
パルスモード試験では燃焼時間と停止時間の組み合わせを変えて行った。又、推力はスタンドの応答性の問題を考慮したのと耐久性の評価を主目的としたため測定しなかった。パルス試験結果の出力データ例を付図 3～付図 5 に示す。図から燃焼時間が短い程燃焼圧の波形が不揃いであることが分る。流量の測定はタービン式とシリンダ式の両方を用いた。定常燃焼での計測値は両者とも良く一致をしていたが、小容量となるパルスモードの場合のデータ解析にはシリンダ式流量計を用いた。図中の階段波形はシリンダ式流量系のレベル信号である。燃焼圧の立ち上がりより若干の遅れがあるように思われるが、これは、配管及び噴射器マニホールドの間に残存している推進剤が先に噴射され着火をしたためと考えられる。又、0.5秒の停止時間では燃焼は完全に終了せず燃焼



付図3 パルス試験出力データ 1



付図4 パルス試験出力データ 2



付図5 パルス試験出力データ 3

圧がわずかながら残っている。これらの事から、本設備とスラスタを用いたパルスモード燃焼による性能を算出する場合、誤差が含まれることを考慮しなければならない。

2.2 性能

連続燃焼試験結果から得られたデータによる性能(真空比推力)は以下の式を用いて算出した。

$$Ispv = Fv / Wt$$

$$Fv = F + \varepsilon \times Ath \times Pv$$

$$Wt = Wo + Wf$$

ここで

$Ispv$: 真空比推力, Fv : 真空推力, Wt : 推進剤質量流量, F : 推力, ε : 膨張比, Ath : スロート面積, Pv : 低圧室圧力, Wo : 酸化剤質量流量, Wf : 燃料質量流量である。

パルスモードについては推力を測定していないため、

一般に用いている以下の式により算出した。

$$Isp-p = Fpc / Wt-p$$

$$Fpc = Fc / Pc \times Pp$$

ここで

$Ispv$: 1パルス当たりの真空比推力, $Wt-p$: 1パルス当たりの推進剤質量流量, Fc : 連続燃焼時の真空推力, Pc : 連続燃焼時の燃焼圧, Pp : 1パルス当たりの燃焼圧の積分値である。

これらの式を用いて算出した性能は以下のとおりとなった。

連続燃焼時: 295秒 (設計, 300秒)

パルスモード時 (0.5秒 ON): 平均 281秒

パルスモード時 (0.3秒 ON): 平均 250秒

パルスモード時 (0.1秒 ON): 平均 162秒

連続燃焼における性能は設計値とほぼ近い値であった。パルスの短い燃焼になるに従って性能が低いのは、前

述した理由による燃焼圧と流量の取り扱いが効いている
ものと思われる。

参考文献

- 1) 佐藤, 只野, 植田他; C/C 複合材のロケット燃焼器
への適用(その2)ロケット燃焼器の試作および評価
試験, NAL - TR1268, 1995
- 2) 液体アポジエンジン研究開発チーム; ETS - VI用液

体アポジエンジンの開発研究(インジェクタ特性),
NAL - TR1250, 1994

- 3) 航空宇宙技術研究所;ロケット・エンジン高空性能試
験設備, TR - 454, 1976
- 4) 只野, 佐藤, 植田他; C/C 複合材のロケット燃焼器
への適用(その1) C/C 複合材のロケット燃焼ガス
加熱評価試験, NAL - TR1264, 1995