固体ロケット用CFRPノズルの燃焼実験による研究

河田幸三・橋本彰三・本堂　明・小林　昭

Ablation Rate Study of CFRP Nozzle for Solid Rocket Use by Means of Burning Test

By

Kozo KAWATA, Shozo HASHIMOTO Akira HONDA and Akira KOBAYASHI

Abstract: Ablation rates of CFRP nozzles with various constitutions are determined for various burning temperatures and times, comparing with glass- and silica- reinforced phenolic plastics nozzles, by means of solid rocket burning test. Although the material itself of reinforcing cloth is a definite factor, the forming process and the orientation angle of the cloths to the central axis of the nozzle are clarified considerably important.

1．まえがき

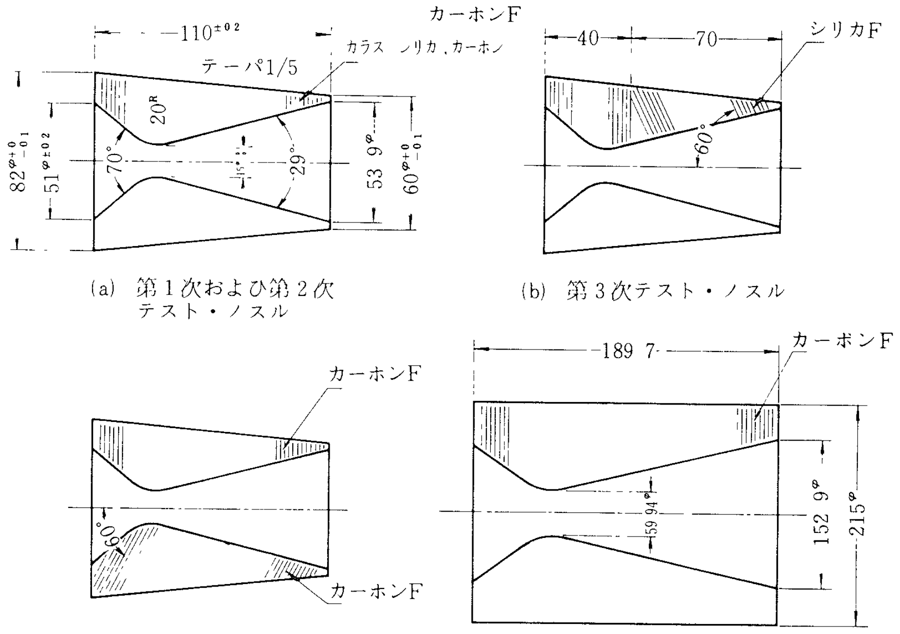
本研究はロケットの大型化に伴い，グラファイト・ブロックに代るロケット用CFRPノズル・スロート材料の開発を目的として，東京大学宇宙航空研究所観測ロケット専門委員会の基礎開発研究の一環として行われたものである［1］～［6］［13］．複合材料の数ある特徴の中で，軽量高強度という特徴と並び，優れたアブレーション特性が注目される．燃焼実験によるアブレーション特性の研究は，ロケット推薬による燃焼実験が非常に費用，人員を要するものであるためか，従来公表された組織的研究は極めて少い［7］～［12］．本研究は観測ロケット専門委員会材料班が推進班の援助を得て行ったもので，ご援助頂いた材料班小原教授及び室員諸氏，推進班倉谷教授，岩間助教授及び同室員諸氏，福田博講師，また関心を持って援助された森，秋葉両教授の諸氏に厚くおん礼申上げる．精密な研究報告としては，あと一，二の実験データの補足が望ましいであろうが，現時点で大勢を見通すに略十分のデータが蓄積されたと考えられるので，以下報告する．ノズル・スロートのCFRP化

について有力な裏付資料を得たものと考えられる．

2．実験計画

テスト・ノズルの大きさは，スロート直径15 φの小型を選んで各種材料と成型条件の比較を行い，この内の有望なものについて成型加工のテストも兼ねて中型の実験（スロート直径60 φ）1場合を行うこととした．

図1に小型及び中型のノズル試片寸度とプリプレグ配向を示す．



(a) 第1次および第2次テスト・ノズル　(b) 第3次テスト・ノズル

(c) 第4次テスト・ノズル　(d) 中型テスト・ノズル

図1． ノズル試片寸度とプリプレグ配向

材料は表1のように，ガラス布，シリカ布，カーボン・クロス，CFプリプレグシートを選んだ．使用した推薬の理論燃焼温度及び燃焼秒時は表2の通りで，推薬自体については推薬性能の実験も兼ねているので岩間助教授の推薬に関する別項報告［*14*］をも参照されたい．

表2で明かなように，第1次実験は2330°Kで比較的低く，第2次実験は2944°Kで高く，この両者でガラス布，シリカ布，カーボン・クロスの差異の大勢が見出された．第3次，第4次は夫々 2742°Kと， 3200°Kであり，CFプリプレグシートを対象とし，長秒時確認試験の意味をもたせた．第4次では，CFプリプレグシートの配向を主流に対し90°と60°の両者にとり，比較を行う目的ももたせている．なお，基材中マトリックスはフェノール樹脂（大日本インキ製，プライオーフェン5900）に固定した。

表1．試験片の種類および成型条件

テストNo.		材料	原布引張強度 たて kg/cm	原布引張強度 よこ kg/cm	成型条件 加熱	成型条件 加圧 kg/cm²	ノズル樹脂含有率 (Wt%)	ノズル比重	繊維シート方向(主流との角度 θ deg)
第1次および第2次テスト	A 1	ガラス布 EMH25CH	40	40	160°×1hr	10	30.4	1.86	90
	2		〃	〃	〃	50	28.4	2.02	〃
	3		〃	〃	〃	150	32.2	1.92	〃
	B 1	シリカ布 EA・502Q	10	9.6	〃	10	33.8	1.68	〃
	2		〃	〃	〃	50	33.4	1.74	〃
	3		〃	〃	〃	150	33.3	1.74	〃
	C 1	カーボンクロス KGF・200	7	8	〃	10	47.5	1.35	〃
	2		〃	〃	〃	10	45.5	1.38	〃
	3		〃	〃	〃	50	43.5	1.39	〃
	4		〃	〃	〃	50	46.8	1.36	〃
	5		〃	〃	〃	150	47.4	1.44	〃
	6		〃	〃	〃	150	47.8	1.43	〃
	D 1	カーボンクロス GF・20	4	1.5	〃	50	47.8	1.39	〃
	2		〃	〃	〃	〃	49.2	1.36	〃
	E 1	カーボンクロス GLC・P6	13	3	〃	〃	43.5	1.33	〃
	2		〃	〃	〃	〃	34.4	1.35	〃
第3次	71	カーボン#2002 シリカ布EA500−Q_2			165°×1hr	10	40カーボン 48シリカ		カーボン 90
	72	カーボロンZ2−1 シリカ布EA500−Q_2			〃	〃	38カーボン 48シリカ		シリカ 60
第4次	80	カーボロンZ2−1 P.P.シート			〃	〃	40	1.49	90
	82				〃	〃	〃	〃	60
	85				〃	〃	〃	〃	90
中型		カーボロンZ2−1 P.P.シート			〃	〃			90

表2．実験計画概要

試片寸度	形状	スロート直径 mm	理論燃焼温度 °K	燃焼時間 sec	アブレーション率 mm／sec	実験場所
小型	図1(a)	15.0ϕ	第1次 2330	～10	極めて小	NTC
	〃 (a)		2次 2944	～10	表3	
	〃 (b)		3次 2742	47～35	0.022	
	〃 (c)		4次～3200	45～78	0.033～0.045	
中型	図1(d)	59.94ϕ		24	0.16	川越

3．実験結果とその評価

表2，3にスロート材料設計，燃焼秒時，燃焼内圧，理論燃焼温度，アブレーションによるスロート直径の変化，スロート半径アブレーション速度など実験条件および結果の要点を示す．

図2は一例として，テスト・ノズルNo．80（第4次テスト，NTC)の燃焼実験の状況を示す．図3，4は第1～4次テストでの若干例の燃焼内圧P_c，等と時間tの関係を示す（なお，推薬，燃焼状況の詳細については，別項岩間助教授の報告をも参照されたい．）図5，6，7は夫々小型ノズル第2，3，4次実験後のスロート径の減耗状況を示す．図8はそれらのスロート原型と比較してのスケッチである．図9は川越で行った中型ノズルの燃焼テスト後の状況を示す．図10はこの中型ノズル・スロートでのアブレーションの方向性についての測定結果を示す。図11は以上を総括して，アブレーションによる半径の増大Δr(mm)～燃焼秒時関係を1枚の図に示したものである．これらの実験とその検討より次の事柄が明かにされた．

(1) 第1次テスト(2330 °K)では，10秒の燃焼秒時で，ガラス布，シリカ布，カーボン・クロス補強の何れについても，スロート径の変化は殆んどない．アブレーション速度は事実上0で，上記範囲の基材では差が認められない．

(2) 2944°Kに理論燃焼温度を上げた第2次テストでは，補強基材によりアブレーション速度に著しい差が現れた．アブレーション速度はガラス布の場合が最大で，以下シリカ布，カーボン・クロスとなり，カーボン・クロスでは銘柄により差が著しい．スロートの減り方は製品により著しく方向性の出る場合がある．

(3) 第3次テストは対象をカーボン補強に絞り。しかも高強度カーボン繊維のプリプレグシートを用いた．理論燃焼温度2742°Kの本テストでは，アブレーション速度は十分小さく，且つスロートの減り方の方向性も僅少で。成績は極めて良好である．

(4) 上記第3次テストでの燃焼秒時は第1，2次の10秒に比べると，長秒時の35～47秒であるが，性能は良い．

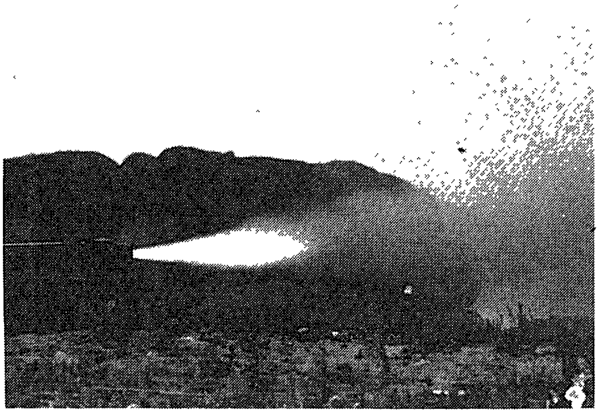


図2。 小型テスト・ノズル燃焼実験状況（第4次テスト，テスト・ノズル No.80 ,NTC）
t ＝10秒の時．

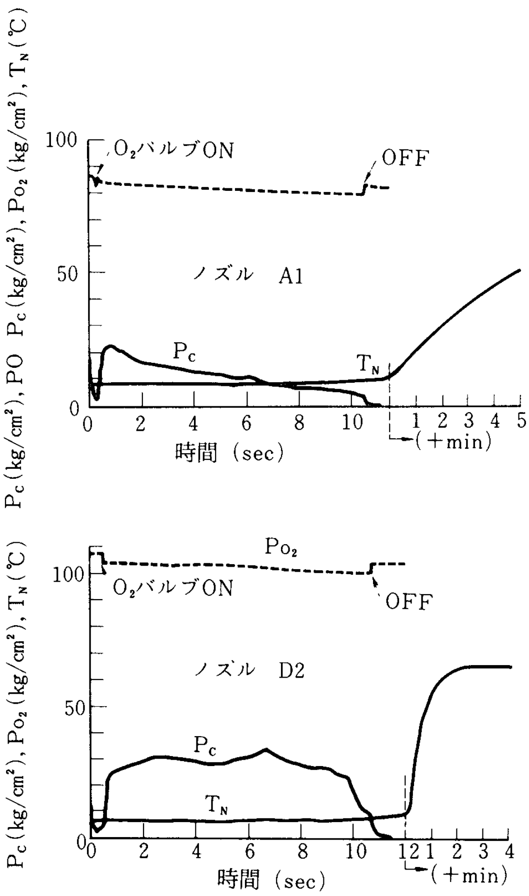


図3． 第1，2次テストでの燃焼内圧P～時間 t 曲線の例，P_C ：チャンバー内圧， P_{O_2} ：O_2圧力，T_N ：ノズル温度．

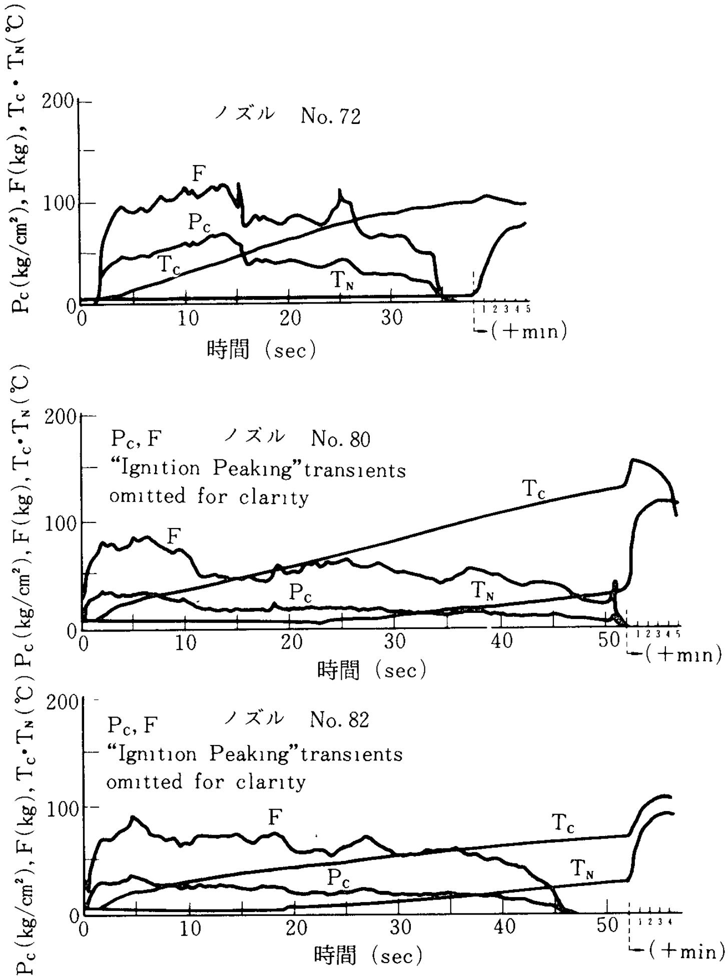
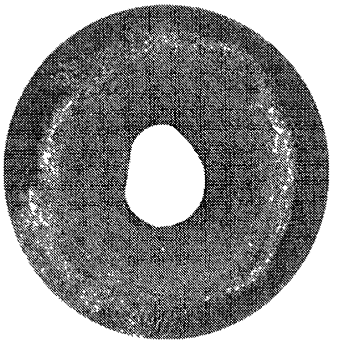
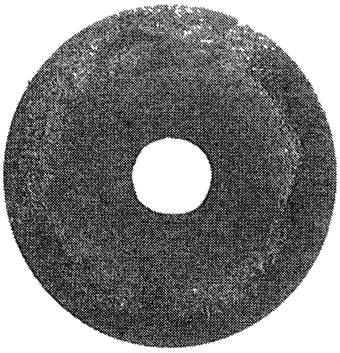


図4． 第3，4次テストでのP～t 曲線の例，
F ：推力，T_C ：チャンバー温度．



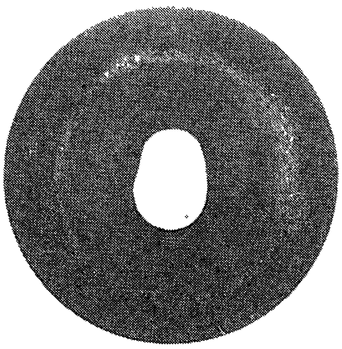
A－1

B－1

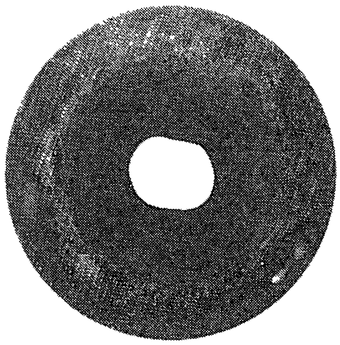


A－2

B－2



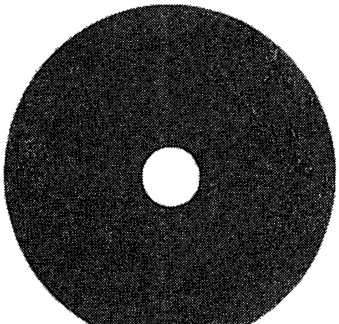
A－3



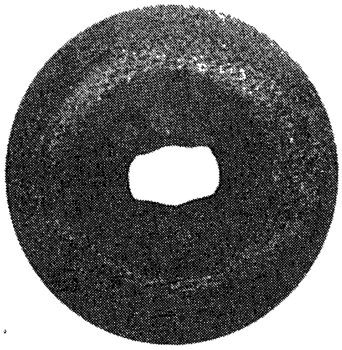
B－3

図5－1　A（ガラス布補強）

5－2　B（シリカ布補強）



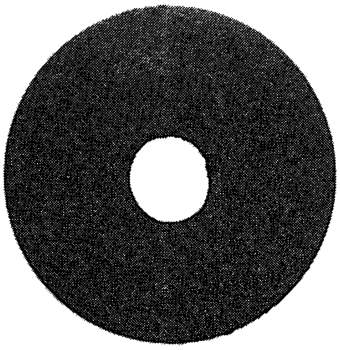
C −1



C −4

C −2

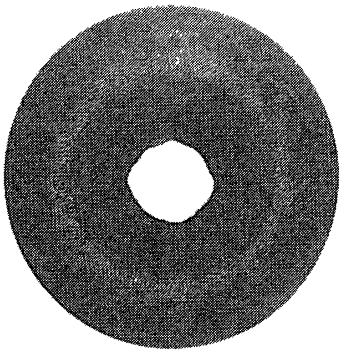
C −5



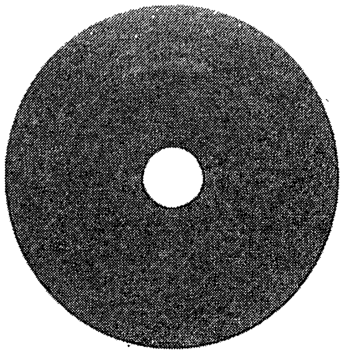
C −3

C −6

5 − 3　C（カーボンクロスＫＦＧ−200補強）

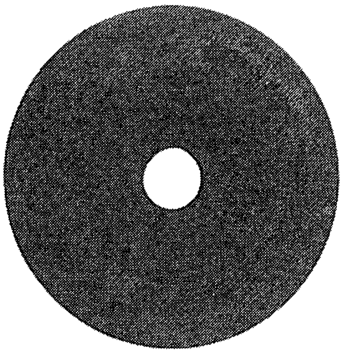


D－1

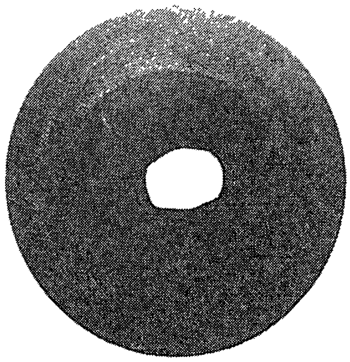


D－2

5－4　D（カーボンクロスGF－20補強）



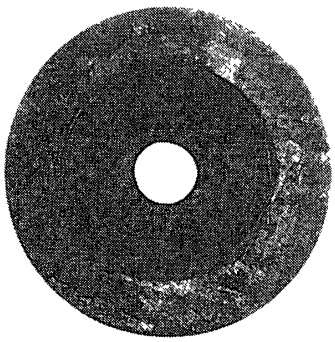
E－1



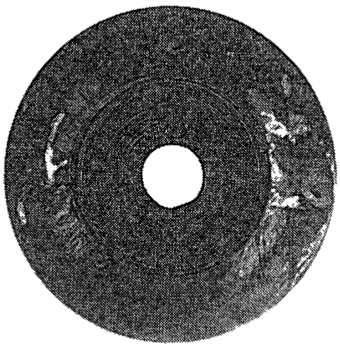
E－2

5－5　E（カーボンクロスGLC－P 6補強）

図5　小型ノズル第2次テスト後のスロート径の減耗状況



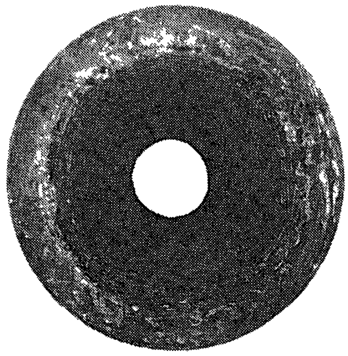
No.71（カーボン# 2002補強）



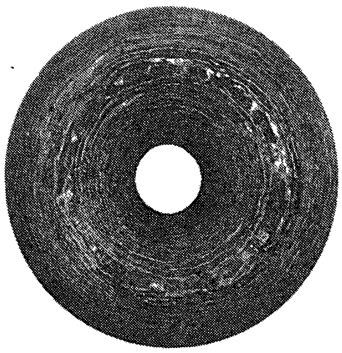
No.72（カーボロンZ2－1プリプレグシート補強）

図6．小型ノズル第3次テスト後のスロート径の減耗状況．

No. 80



No. 85



No. 82

図7。　小型ノズル第4次テスト後のスロート径の減耗状況

No. 80，82，85（カーボロンZ2－1プリプレグシート補強）

ノズル No.	燃焼秒時 (sec)	理論燃焼温度 (°K)	アブレーション速度(mm/sec)	P.P.方向(主流との角度 θ deg
80	50.9	≈3200	0.045	90
82	45.4	〃	0.033	60
85	78.0	〃	0.036	90

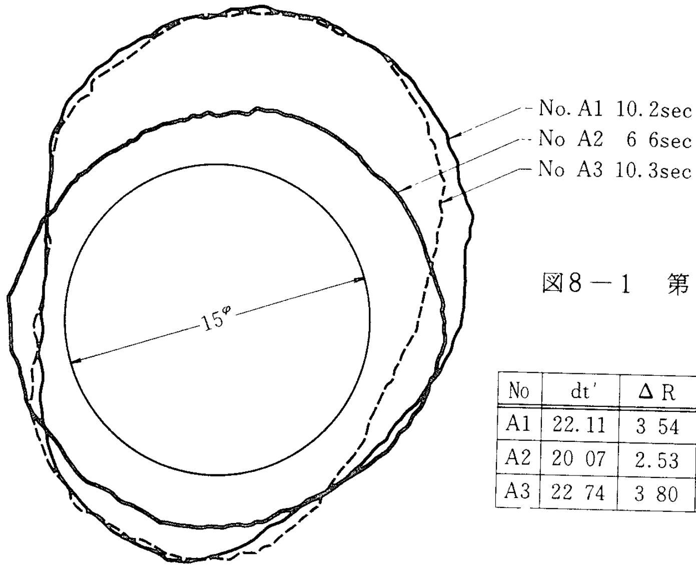


図8－1 第 2 次 A

No	dt'	ΔR	dR/dt
A1	22.11	3 54	0 347
A2	20 07	2.53	0.383
A3	22 74	3 80	0.368

(mm/sec)

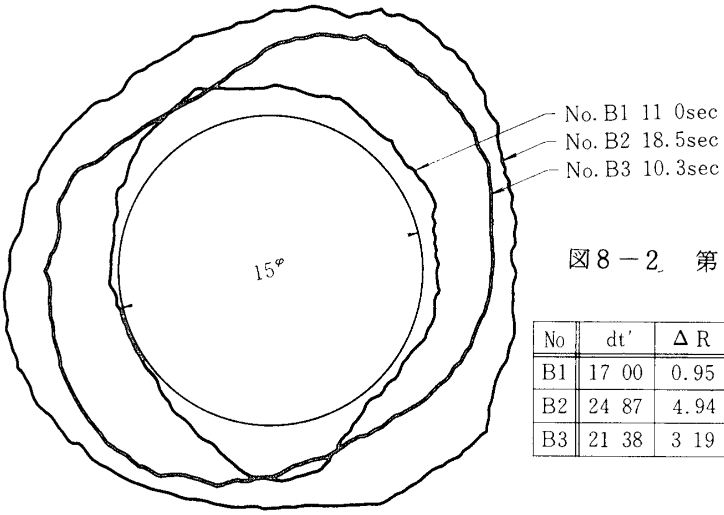


図8－2 第 2 次 B

No	dt'	ΔR	dR/dt
B1	17 00	0.95	0.086
B2	24 87	4.94	0.267
B3	21 38	3 19	0.309

(mm/sec)

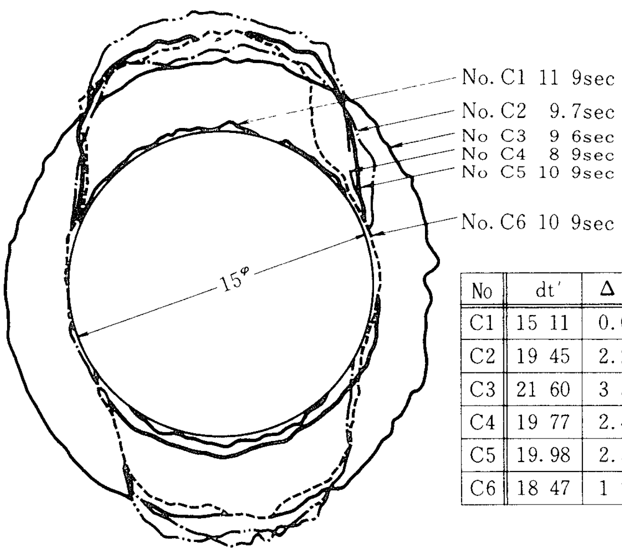
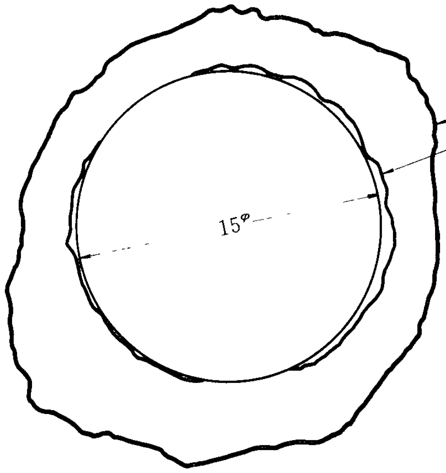


図8－3
第 2 次 C

No	dt'	ΔR	dR/dt
C1	15 11	0.06	0.005
C2	19 45	2.22	0.229
C3	21 60	3 35	0.348
C4	19 77	2.40	0.269
C5	19.98	2.56	0 142
C6	18 47	1 73	0 158

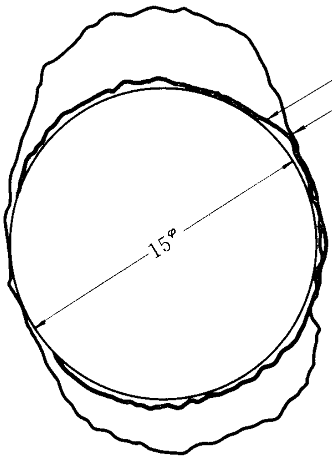
(mm/sec)



No	dt'	Δ R	dR/dt
D1	21.19	3.12	0.284
D2	15.25	0.18	0.017

(mm/sec)

図8－4　第　2　次　D



No	dt'	Δ R	dR/dt
E1	15 32	0.22	0.021
E2	17.91	1.54	0.111

(mm/sec)

図8－5　第　2　次　E

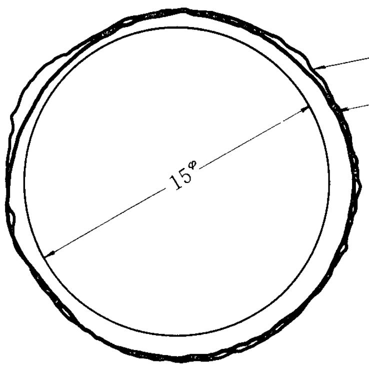


図8－6　第　3　次

No	dt'	Δ R	dR/dt
72	17.03	1.01	0.022
72	16.68	0.78	0.022

(mm/sec)

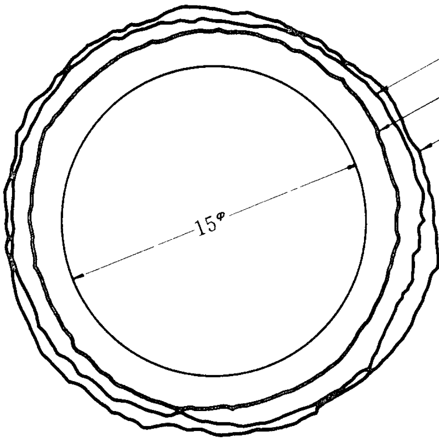


図8－7 第 4 次

No	dt'	ΔR	dR/dt
80	19 73	2.28	0.045
82	18 03	1 51	0.033
85	20 58	2.79	0.036

(mm/sec)

図8。 小型ノズル第2～4次テスト後のスロート径の減耗状況スケッチ。

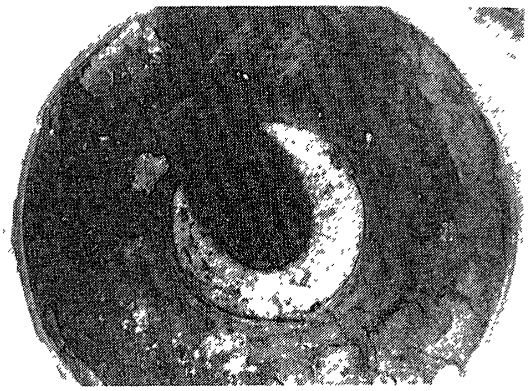


図9－1 前面よりの概観

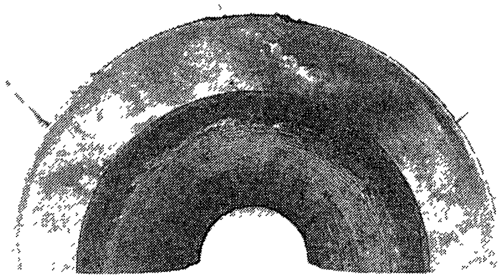


図9－3 正 面

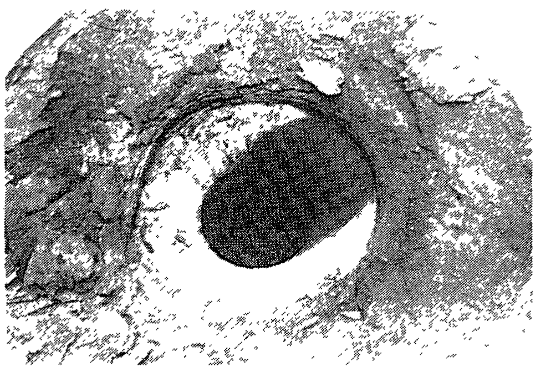


図9－2 前面よりの概観

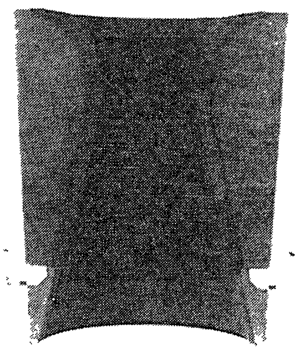
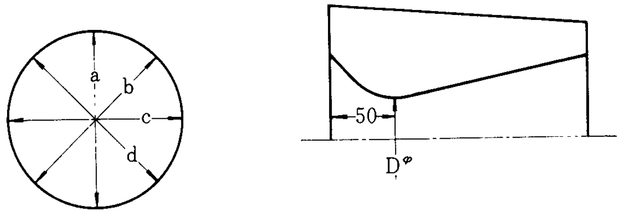


図9－4 縦断面（熱の影響をうけた部分の厚さが変色により知られる．約13～14 mm）

図9． 中型ノズル燃焼後の状況



測定位置	a	b	c	d
Dφ	68.1	66.8	67.4	67.6

dt'	ΔR	dR/dt
67.48	3.77	0.158

(mm/sec)

D点の図面寸法60φ±1

図10．中型ノズル燃焼後のスロート径の測定結果

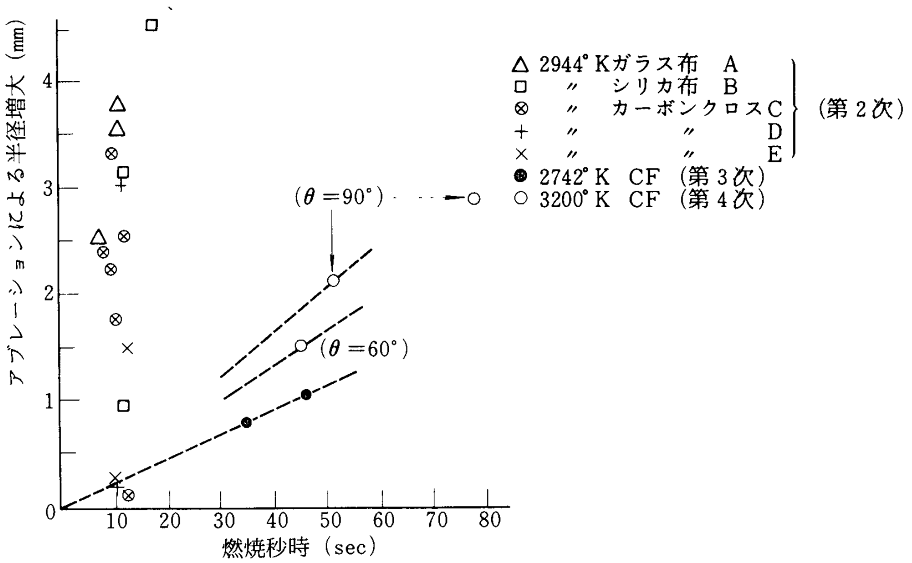


図11．アブレーション〜燃焼秒時の関係

表 3．実験結果

テストNo.		ノズル組成	テスト前 スロート直径 mm	テスト前 重量 g	テスト後 スロート直径 mm	テスト後 重量 g	スロート半径変化 Δr mm	重量損失率%	アブレーション率 mm／sec	P_c平均 kg／cm^2	P・t kg・sec／cm^2	燃焼時間 sec	燃焼温度（理論値）	センイ方向
第1次		第2次と同一					極めて小		極めて小				2330°K	90°
第2次テスト	A 1	ガラス布 EMH25CH	15.04	627.9	22.11		3.54	8.51	0.347	12.0	122	10.2	2944°K	〃
	2		15.02	694.5	20.07		2.53	4.51	0.383	18.3	120	6.6	〃	〃
	3		15.15	638.0	22.74		3.80	7.01	0.368	13.2	136	10.3	〃	〃
	B 1	シリカ布 EA・502Q	15.11	579.7	17.00		0.95	3.50	0.086	19.8	218	11.0	〃	〃
	2		14.99	588.6	24.87		4.94	10.13	0.267	10.9	202	18.5	〃	〃
	3		15.01	588.5	21.38		3.19	5.49	0.309	15.4	159	10.3	〃	〃
	C 1	カーボンクロス KGF・200	14.99	455.9	15.11		0.06	2.90	0.005	23.2	275	11.9	〃	〃
	2		15.01	456.4	19.45		2.22	6.00	0.229	17.3	167	9.7	〃	〃
	3		14.91	461.6	21.60		3.35	4.03	0.348	24.5	235	9.6	〃	〃
	4		14.97	459.0	19.77		2.40	6.56	0.269	25.4	226	8.9	〃	〃
	5		14.87	475.0	19.98		2.56	4.04	0.142	18.8	205	10.9	〃	〃
	6		15.02	470.6	18.47		1.73	5.08	0.158	19.8	216	10.9	〃	〃
	D 1	カーボンクロス GF・20	14.95	452.5	21.19		3.12	4.60	0.284	15.5	171	11.0	〃	〃
	2		14.90	453.5	15.25		0.18	4.74	0.017	26.5	276	10.4	〃	〃
	E 1	カーボンクロス GLC・P6	14.88	454.9	15.32		0.22	7.57	0.021	9.7	102	10.5	〃	〃
	2		14.84	450.1	17.91		1.54	5.33	0.111	13.8	190	13.8	〃	〃
第3次	71	前部：カーボン布	15.00	525.2	17.03		1.02	7.10	0.022	20.4	969	47.0	2742°K	カーボン90°
	72	後部：シリカ布	15.12	536.9	16.68		0.78	6.17	0.022	41.8	1382	35.0	〃	シリカ60°
第4次	80	カーボロンZ2−1 P.P.シート	15.17	511.5	19.73	461.2	2.28	9.83	0.045	18.3	930	50.9	≈3200°K	90°
	82		15.01	509.5	18.03	464.2	1.51	10.89	0.033	23.5	1068	45.4	〃	60°
	85		15.00	511.0	20.58	451.0	2.79	11.74	0.036	18.4	1302	78.0	〃	90°
中型		カーボロンZ2−1 P.P.シート	59.94		67.48		3.77		0.158	40.0	952	23.8		90°

(5) 第4次テストでは，材料の対象は従来最も良かったカーボン繊維のプリプレグシートに限定し，3200°Kの温度，45〜78秒の長秒時，プリプレグシートの主流方向に対する配向角度の影響を見ることを目的とした．第3次に比べ燃焼温度の高い分だけアブレーション速度は大きくなっているが，長秒時でアブレーション速度の絶対値は十分小さく，スロートの減り方の方向性も良い．且つ，プリプレグシートの配向角度 $\theta=60°$ の場合が，直角積層 $\theta=90°$ の場合を1として，アブレーション速度で66／100に低下することが知られた．

(6) 中型ノズル（直角積層）でのアブレーション後のスロート直径のバラッキは平均値に対し，1000分の9.2である．

(7) 第1〜4次のすべての結果をアブレーションによるスロート半径の増大〜燃焼秒時の関係としてプロットすると，図11のようになる．第3次の実験によれば，燃焼秒時47秒までのカーボン繊維プリプレグシート補強フェノール樹脂スロートについて，アブレーションは燃焼秒時に比例している。より高温，又はより長秒時ではこの関係が非線形になるか否かについては，その範囲の実験に俟つ必要がある．しかし，第4次の3200°Kまでの範囲では50秒程度の燃焼秒時までは少くとも，略線形の関係と考えて大過ないと推測される．

4。まとめ

(1) スロート径15 ϕの小型ノズル及びスロート径60 ϕの中型ノズルについて，燃焼実験によるアブレーション速度の実測を広汎な材料設計について行った．但し，マトリックスはフェノール樹脂に限定してある。

(2) 理論燃焼温度2330°K程度の比較的低い温度では（少くとも燃焼秒時10秒までは），ガラス布，シリカ布，カーボン・クロスでアブレーション速度は事実上0である．

(3) 理論燃焼温度2944°Kではアブレーション速度に顕著な差が出，ガラス布で最大，以下，シリカ布，カーボン・クロスの順となるが，カーボン・クロスも銘柄により優劣の差がかなりある．

(4) 高強度カーボン繊維プリプレグシートは，理論燃焼温度2742°K，3200°Kの両者で数10秒の長秒時燃焼に対し，アブレーション速度は十分小さい．

(5) 主流に対するカーボン繊維プリプレグシートの配向角度は重要である．主流に対する傾斜角 $\theta=60°$の時，$\theta=90°$に対し，（3200°Kの燃焼温度で）66／100にアブレーション速度が低下する．

(6) 加工成型法が重要である［*13*］．

(7) ＣＦＲＰノズル・スロートの大型ノズルへの適用は可能と判断される．

昭和51年9月27日材料部

参考文献

［*1*］ 河田幸三，橋本彰三，本堂明：固体ロケットＦＲＰノズルテストについて，宇宙航空材料シンポジウム溝演集（第4回）（1974／2），27．

［*2*］ 同上：固体ロケット用ＦＲＰノズルテストについて（Ⅱ），同上（第5回）（1975／2），31．

［*3*］ 同上：固体ロケットCFＲＰノズルテストについて，日本航空宇宙学会第6回年会溝演会溝演

集(1975/4), 25

[4] CERPノズル開発研究中間報告, 東大宇航研観測ロケット専門委員会資料(1976/5).

[5] 河田幸三, 福田博, 橋本彰三, 本堂明:CFRPノズルのアブレーション・レートについて, 第18回構造強度講演集(1976/7), 236.

[6] 日産自動車宇宙航空部:M-13シミュレーション・モータ地上燃焼実験報告書(1975/7).

[7] 古田敏康, 五代富文, 豊原恒彦:FRPノズルの研究, 宇宙航空工学におけるFRPシンポジウム(第3回)(1968), 48.

[8] J.M. Winter, D.A. Peterson: Development of Improved Throat Insert for Ablative Rocket Engines, NASA TN D-4964(1969).

[9] K. Sutton: An Experimental Study of a Carbon-Phenolic Ablation Materials, NASA TN D-5930(1970).

[10] 竹中幸彦, 吉山厳, 岩田正明, 野口廸宏:FRPノズルの試作試験, 宇宙航空工学におけるFRPシンポジウム(第5回)(1970), 45.

[11] 小原嗣朗, 武藤範雄:グラファイト-FRP積層材料を用いたノズルの研究, 同上(第6回)(1972), 11.

[12] 犬竹祝弘, 柳沢健一, 中村昌邦:液体ロケット用FRPノズルの開発研究, 宇宙航空材料シンポジウム(第4回)(1974), 32.

[13] 河田幸三, 福田博:CFRPノズルの成型と強度に関する若干の検討, 東大宇航研報告, 第13巻第1号(B), (1977), 369

[14] 霜田正隆・山谷寿夫・祖父江照雄・青柳鐘一郎・斉藤猛男・岩間彬:ノズル試験のための端面燃焼固体ロケット・モータの開発, 東大宇航研報告, 第13巻第1号(B), (1977)