

レトロモータ真空燃焼実験

倉谷 健治

L-4S-5 には 500B₃ エンジンの燃えがらを減速させる目的でレトロモータ RM が 500B₃ 側に取付けられることになっている。レトロモータとしての所要能力は 500B₃ の残留推力が推定されれば決定されるが、この件については別項のごとき検討が加えられ、その結果新しくモータを開発することは止めて、開発済みの L-デスピノモータ 4 個をそのまま流用することとし、次に RM の取付位置について、500B₃ のノズル外側の空間と 500B₃ 鏡板と CN 後部間の空間との 2 案について検討された。

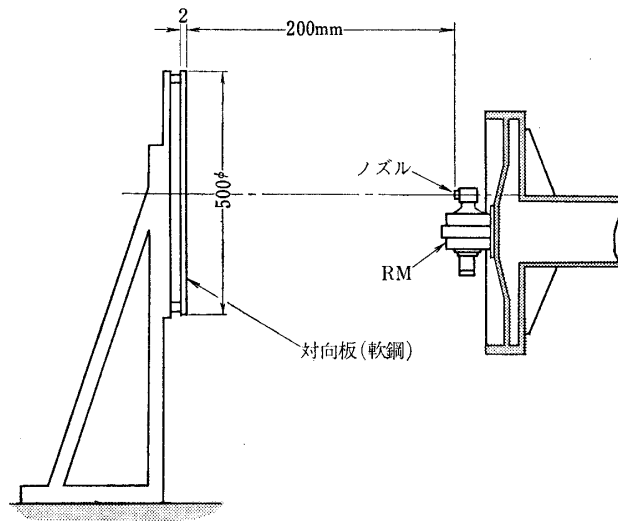
ノズル側に付ける案では、RM と CN とは 500B₃ のエンジン長だけの間隔が B₃-CN 分離前からすでに確保されているので、RM の上段部への影響は当然小となる利点がある。しかし、L-ロケットの 2 段-3 段の接手部の切断機構はようやく改良案が固定化した状態で、これを RM 搭載のため、再度大幅に改造することは構造的見地から好ましくなく、また RM ノズルが、B₃-B₂ 接手傾斜部から外へ突出し、空力加熱を受けやすいこと、500B₃ の外板のさらに外側にケーブルを配線せざるを得ないことなどの難点も挙げられ、結局、500B₃ 鏡板側にレトロモータを取付けることに落ち着いた。

さて、レトロモータを B₃-CN の段間に持ってくると、空間的制約から、L-用デスピノモータのノズルを膨脹比 43.5 より 3.5 にまで短縮せざるを得なくなり、また CN 側の過酸化水素タンクの形状から、CN 側後端部も段違い構造となる。そこで CN 部への熱的影響を極小化するために、中央部外側に FRP 板を取付けることとし、B₃-CN 間の接手部を L-4S-4 号機より約 50mm 延長するだけで、全系を収容するように改造された。したがって今回の真空燃焼実験でも、CN 側後端部に相似させた対向板を用意して各種の実験を行なったが、その模様は図 2 に示されている。

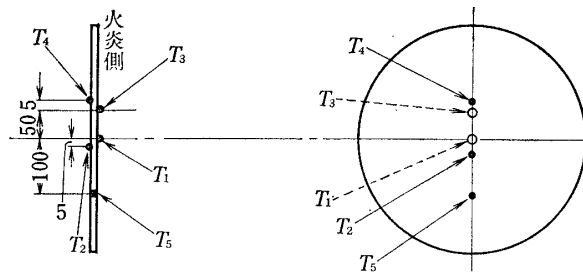
このようにして、L-4S-5 号機の B₃-CN 間の構造設計案が固められたので、このレトロモータについて、下記の目的のもとに一連の実験が企画された。もちろん、これらの実験は、実際のフライト時に B₃ 切断時期で遭遇するような高真空下で RM を燃焼させて行なうことが望ましいが、設備の関係上、日産、川越第 2 実験場に設置されている到達真空度 1 torr, 50m³ の容積の真空槽を用いることにした。実験に当っては、レトロモータの性能を確認する意味で

- 1) 延時管の延時秒時の変動
- 2) RM の内圧、推力、全燃焼秒時の測定とその変動
- 3) ノズルカットに伴う比推力値の変化の実測
- 4) RM 取付部の強度確認

が計測されたのはもちろんであるが、新しく提起された問題に対処するために主力はむしろ

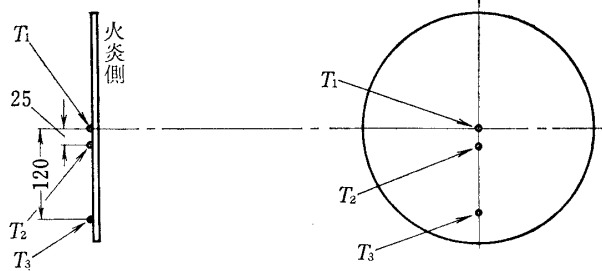


RM-3



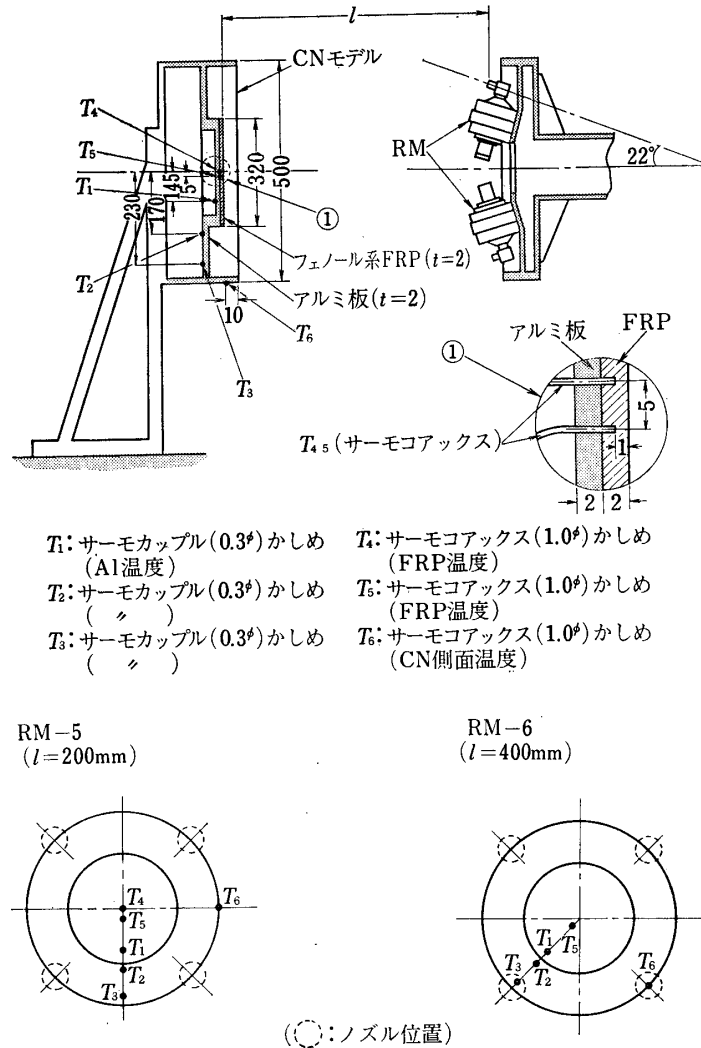
- T₁: サーモアクセス(0.3 ϕ)ろうづけ
- T₂: サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
- T₃: サーモアクセス(0.3 ϕ)ろうづけ
- T₄: サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
- T₅: サーモアクセス(1.0 ϕ)かしめ
(かしめ深さ板厚中央)

RM-4



- T₁: サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
- T₂: サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
- T₃: サーモアクセス(0.3 ϕ)ろうづけ

図 1 RM と対向板, および熱電対位置



- | | |
|--|---|
| T_1 :サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
(Al温度) | T_4 :サーモコアックス(1.0 ϕ)かしめ
(FRP温度) |
| T_2 :サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
(ϕ) | T_5 :サーモコアックス(1.0 ϕ)かしめ
(FRP温度) |
| T_3 :サーモカップル(0.3 ϕ)かしめ
(ϕ) | T_6 :サーモコアックス(1.0 ϕ)かしめ
(CN側面温度) |

図 2 RM と対向板, および熱電対位置

- 5) 真空下 (1~10 torr 程度) でのロケット火炎のひろがり温度分布
- 6) RM 火炎に対向する CN 部への熱的影響*と, 風圧の測定
- 7) フォトランジスタを RM より適当な間隔を置いて設置し, RM 火炎を検知することに向けられた**.

1. 実験計画の概要

前後 6 回行なわれた真空燃焼実験の実験条件および測定項目をはじめに表 1 にまとめ, 次に各項目につき各論的に述べて行くこととする.

* 本シリーズの実験前にデスピナーモータを用い (ノズル膨脹比 43.5) 耐熱遮蔽板 (FRP) の耐熱試験が行なわれ, 意外に温度上昇の少ないことが実証されている.

** 本報告は多数の実験班員から寄せられた報告をとりまとめたもので, 項目ごとに担当者を記入しておく.

表 1

No.	目 的	実 験 条 件	date	RM 数	エンジン計測				
					P_c	F	t_a	t_{bo}	P_{vac}
#1	火炎のひろがり	対向板なし	44.12.3	1	○	—	○	○	○
2	"	"	44.12.3	1	○	—	○	○	○
3	対向板の ΔT	鉄板, $l=20\text{ cm}^{*1}$ RM を鉄板正面より噴射 (Fig. 2-i)	44.12.5	1	○	○	○	○	○
4	"	"	44.12.6	1	○	○	○	○	○
5	CN 板への影響	RM 4 個を実機通り配置 CN モデル, $l=20\text{ cm}$ (Fig. 3-i)	44.12.9	4	○	○	○	○	○
6	"	CN モデル, $l=40\text{ cm}$	44.12.10	4	—	○	—	○	○

No.	放射温度	火 ITV 赤外	ITV 可視	炎 8 mm 可視	赤外 写真	対 向 温度上昇	板 風圧	RM 支持板歪	フォト トランジスタ	ガス分析
#1	①	②不良	③	—	—	—	—	—	○	—
2	①	②	③	—	—	—	—	—	○	—
3	①	②	③	④	—	○	—	—	不良	—
4	①	②	③	④	—	○	○	—	—	○*4
5	①*2	②消去	③	④	—	○	○	○	○	—
6	①*2	②	③	—	④記録班*3	○	○	○	○	○

*1 l はノズルと対向板の距離

*2 遠隔操作により火炎を上下方向に走査した。○印の中の数字は窓位置 (図 9 参照)

*3 モータドライブカメラ 2 コマ/秒。赤外感光フィルムを使用したのが絞り 4.5 では感光せず

*4 研究室へ運搬中、ガラス容器破損し、採取ガスは散逸した。

2. 燃 焼 性 能

RM は推薬 UP-25, 薬量 290~300 gr で, 点火器には NAB-2 ペレット 4.2 gr が充填され $5.0 \pm 0.3\text{ sec}$ の延時管がつけられている。実験は図 1, 2 に示す, RM 支持台に RM を取付け 50 m^3 の真空槽内で行なった。真空槽の初期圧は, 可能な限り低くすることとし 1~3 torr まで排気した。また, RM 4 個の場合は図にみられるように, 各々のモータは中心軸と 22° の方向に噴射するため, 1 個当りの推力値は RM 1 個単独噴射のときよりも見掛上, 小さくなる。次に RM のスロート径は 4.6 mm であるが, 構造上の制約から, 膨脹比 3.5 (出口径 8.6 mm) にカットされている。

燃焼特性は通常の方法により測定されたが* その結果を表 2 に, 代表的な圧力-時間, 推力-時間曲線を 1 例として図 3 に示しておく。なお表 2 に用いた各項の定義は図 3 中に記入されている。

燃焼性能についてはここでは特に述べることもないが, 同種モータが多数回地上燃焼実験

* 日産自動車が計測を担当した。

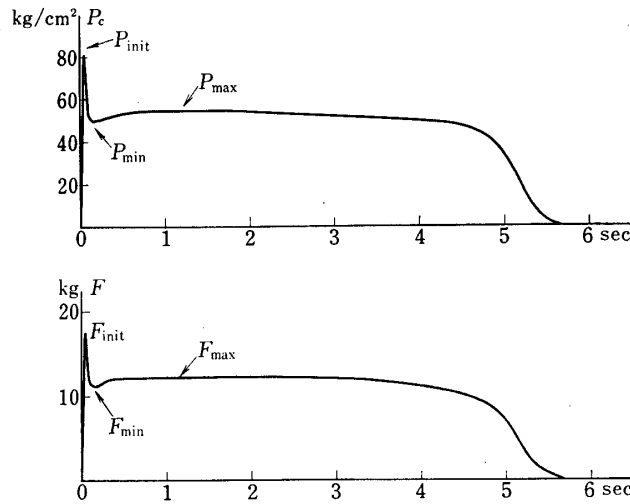


図 3 レトロモータの内圧, 推力曲線

表 2

番 号	#1	#2	#3	#4	#5				#6
					i)	ii)	iii)	iv)	
気 温 °C	12	12	8	7.5	10				11
初期内圧 P_{init} kg/cm ²	84.9	75.9	83.3	88.6	78.5	82.4	72.0	73.0	—
最小内圧 P_{min} "	51.4	52.8	50.1	56.3	53.2	50.5	50.3	50.3	—
最大内圧 P_{max} "	55.7	57.1	56.2	59.5	57.8	57.0	53.1	56.4	—
全平均内圧 \bar{P}_{total} "	47.8	50.0	48.2	52.1	47.1	47.2	46.4	48.2	—
初期推力 F_{init} kg	—	—	18.1	19.0	72.7				64.0
最小推力 F_{min} "	—	—	10.9	11.1	46.8				44.0
最大推力 F_{max} "	—	—	12.2	12.8	47.6				48.2
全 力 積 $\int Fdt$ kg·sec			59.2	61.1	237.7				236.0
全 燃 焼 秒 t_{total} sec	5.74	5.56	5.69	5.45	5.77	5.73	5.58	5.67	(5.70)*
時 延 時 秒 時 t_{delay} "	5.24	5.16	5.23	5.23	5.16	5.20	5.15	5.20	(5.20)
真 空 度 P_{vac} torr	3→13	1→10	2→13	3→12	1→32				1→29
比 推 力 I_{sp} sec			200	206	199**				198**

* () 内の値は 4 個同時噴射の際の推力曲線より求めたもので、個々の RM についての値ではない。したがって標準偏差を求めるときにはこの値は省略した。

** RM 4 個同時噴射においては、各 RM は主軸に対し 22° 傾いている。したがって RM 1 個当りの比推力に補正すると、それぞれ 214, 213 sec となる。

される機会はほとんどないから、今回のデータは同一ロットから得られる小型モータの各種燃焼性能の分散を知り得る貴重な資料といえよう。内圧の初期値は点火器の影響が大きいのので RM の分散とはみなすことはできないが、その他の最大内圧 P_{max} , 全平均内圧 \bar{P}_{total} , 最小内圧 P_{min} , 全燃焼秒時 t_{total} , は RM の、延時秒時 t_{delay} は延時管のばらつきを示し

ている。参考として、RM 製造時のばらつきを示すために推薬重量についても標準偏差を求めた。

同一ロット内の多数のモータが燃焼実験された例としては、五代 [1] らが比推力測定の際

表 3

	n	\bar{X}	σ	σ/\bar{X}	五代 $\sigma/\bar{X}(n)^*$
初期圧 P_{init}	8	79.8	5.55 kg/cm ²	6.96 %	9.00 % (7)
最小内圧 P_{min}	8	51.8	2.01 "	3.87	3.94 (7)
最大内圧 P_{max}	8	56.6	1.72 "	3.03	1.06 (7)
全平均内圧 \bar{P}_{total}	8	48.4	1.72 "	3.57	1.22 (7)**
全燃焼秒時 t_{total}	8	5.65	0.10 sec	1.81	1.62 (7)
延時秒時 t_{delay}	8	5.20	0.034 sec	0.645	—
薬量 W_p	12	297	3.3 g	1.11	0.356 (18)

* () 内はサンプル数

** 有効燃焼秒時間の平均

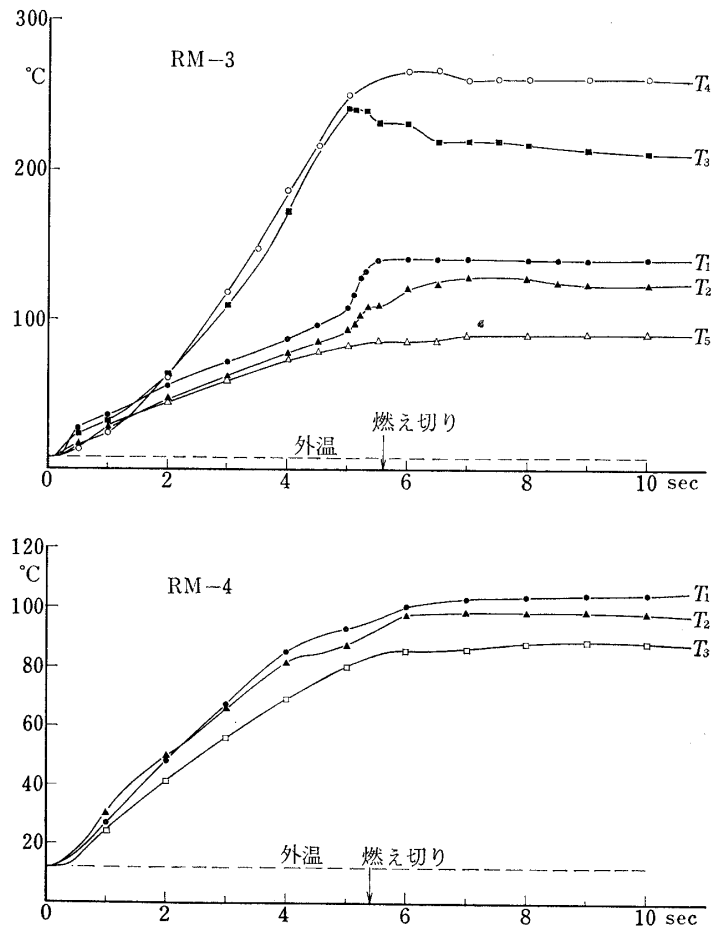


図 4 対向板の温度計測

準化をめざしてダブルベース推進を用いて精密測定を行なった結果が発表されている。今回の実験値と比較する意味で五代らの実験値からもばらつきを計算して表3の右欄に示しておく。今回は推力関係の計測例が少ないので標準偏差等は求めなかったが、五代らの実験では推力関係の計測値も豊富でしかも精密計測が行なわれているので貴重な参考資料とみられる。

3. 対向板への影響

a) 温度上昇*

RM #3~#6 においては対向鉄板または CN モデルにサーモコックスまたはサーモカップルを図1,2に示す要領でろう付けあるいは先端を埋込んでかしめ、温度上昇を測定した。実験結果は図4,5に示されている。

以上の実験結果を整理し、各点での最高到達温度を一括して表示したものが表4である。また RM #3 と #4 とでは実験条件が類似しているため、対向板の中心からの距離と最高

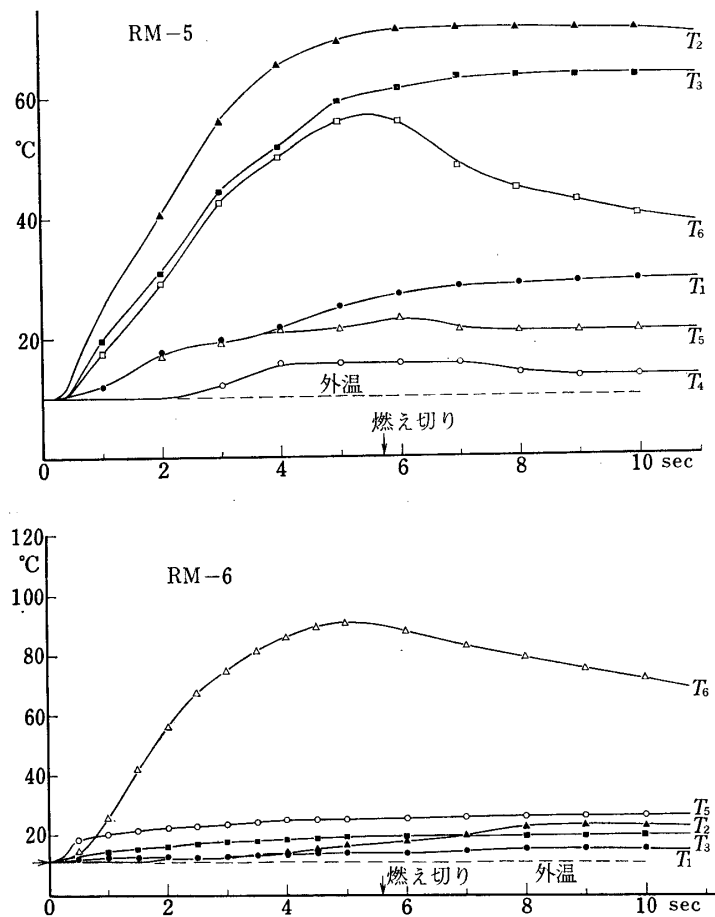


図5 対向板の温度計測

* 秋葉研, 秋葉, 加勇田, 三浦, 中部担当

表 4

# 3			# 4			# 5			# 6
No.	R cm	°C	No.	R cm	°C	No.	R cm	°C	°C
T ₁	0	140°表	T ₁	0	103°	T ₁	14.5	29°	16°
T ₂	0	130°裏	T ₂	2.5	98°	T ₂	17	71°	23°
T ₃	5	240°表	T ₃	12	78°	T ₃	23	64°	20°
T ₄	5	265°裏	中心層よりやや 裏より			T ₄	0	16°	—
T ₅	10	90°表				T ₅	0.5	23°	26°
						T ₆ †	25	57°	91°

R: 中心からの距離

† #5 はノズルから 20 cm, #6 は 40 cm 離れている。#6 の方が高温なのは、#6 では T₆ はノズルの正面に来るが、#5 では 2 個のノズルの中間に位置するからである。測定点の詳細な位置は図 1, 2 に示されている。

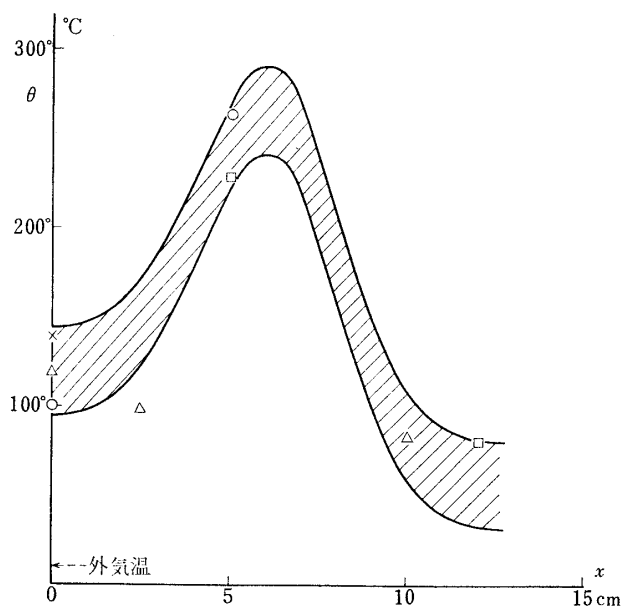


図 6 対向板の温度上昇

到達温度との関係を一つにまとめることができ図 6 がえられる。

d) 風 圧*

実験 #3 で RM 噴射時に対向板のゆれが大きいことを VTR 録画より知ったので、CN 側に風圧による悪影響の発生することを懸念して対向板の受ける力を実験 #4 以降で測定した。RM 支持棒をロードセルに伝える推力受けは固定台から出た 3 個のベアリング上を滑動しうる構造 (固定台は 2 個所) となっているので、図 7 に示すようにこの固定台と対向板支持棒とから、それぞれ 10φ のスチール棒を伸ばし、中間に幅 10 mm, 厚さ 0.5 mm のスチール板を連結し、このスチール板にひずみゲージをはって対向板の受ける力を測定した。

* 計測は日産担当。

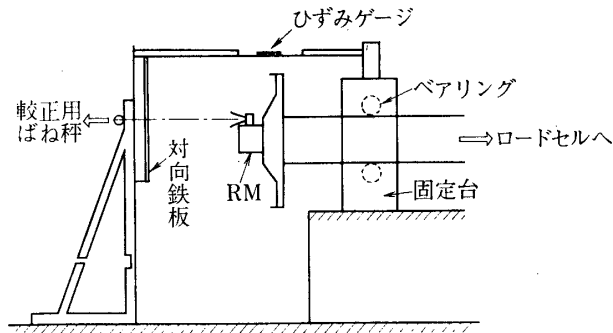


図7 風圧の計測法

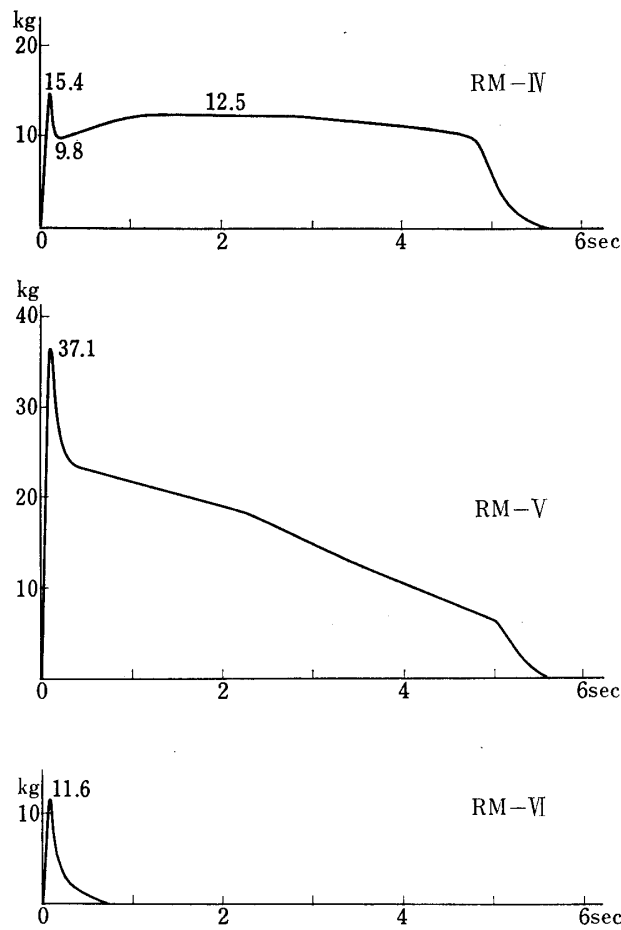


図8 対向板の受ける力

較正には対向板支持棒の中央部にばね秤を取付け、一定の力で引張ってひずみゲージ出力と比較する方法によった。

RM 燃焼中には、排気のため、真空槽圧も上昇し、したがって火炎の拡がり方も変わって行くが、実験 #4 では対向板に正面から火炎が吹きつけられているので、火炎の拡がりも変化しても対向板の受ける力は変化せず、ほぼ RM の推力-時間曲線と類似したものとなる

が、実験 #5 では炎が軸方向と 22° の角をなしているので、環境圧の増加とともに、炎は縮小し、対向板の受ける力も漸減する。これに対し、実験 #6 では対向板が 40 cm と離れたので、点火直後の急激な衝撃以外は、火炎がほとんど対向板に当たらないので、対向板が受ける力も観測されない。これらの結果は図 8 に示されている。

なお、この試験と平行して、真空中への燃焼ガスジェット噴出の理論計算を行ない [2]、レトロモータノズルから 2 m の距離において、ジェットに垂直におかれた直径 50 cm の円板の受ける力が 0.2 kg、熱量は 0.7 kcal/sec 程度であるとの推定を得た。これにより実機では安全を見て CN 部が少なくとも 2.5 m 離れたときにレトロモータを働かせることにした。

4. 火炎の状況

a) 火炎の放射温度*

東芝製赤外放射温度計 PP-2B を用いた。この温度計は光学レンズ系により被測定物の任意の場所で、断面積 1 cm^2 に視野を絞ることができ、 $0.9\sim 3\mu$ の赤外領域の放射線強度から $150\sim 450^\circ\text{C}$ の放射温度を 0.1 sec のレスポンスで測定しうる。

実験に際しては、測定用カメラを図 9 の真空槽外に設置し、窓ガラス 1 (メタアクリル酸樹脂) を介して火炎をのぞき、遠隔操作により温度を記録した。実験結果の概要は表 5 に、測定位置とともにまとめ、個々の例は図 10 に示してある。なお、温度の較正には、測定点位置に較正済みの Ni-NiCr 熱電対を埋込んだ $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 3\text{ mm}$ の加熱鉄板 (表面を煤で黒化してある) を置き、その冷却過程を放射温度計、熱電対温度計で同時記録する方式によった。

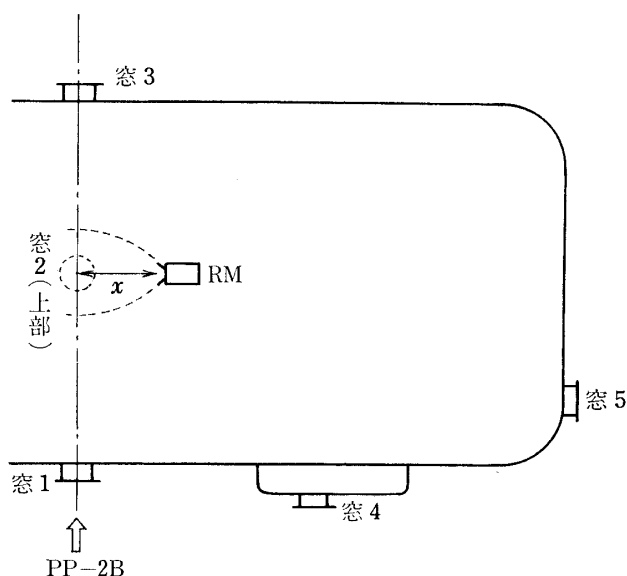


図 9 真空槽窓位置と RM との関係

* 大島研大島, 小林担当

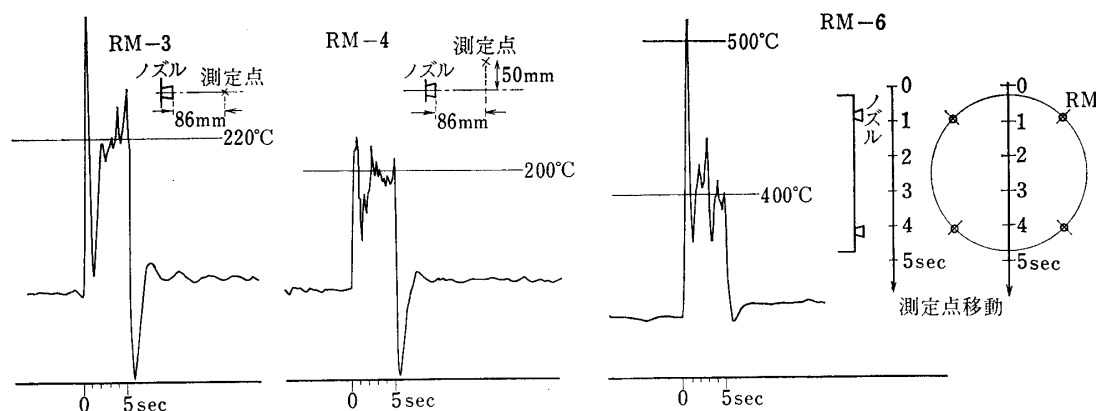


図 10 火炎の放射温度

表 5

	窓の見通し線と RM ノズル間の距離 x (図参照)	測定された視野	測定値平均	測定結果の概要
# 1	~30 cm	噴流の軸上, ノズルより 86 mm はなす	スケールアウト	{ 着火直後に高温となり†, あとは, ほぼ一定. 終了時 {ブローアウトの影響あり
# 2	~30 cm	"	215°C	
# 3	~9 cm	"	220°C	{ 同上 {対向板の影響なし
# 4	~9 cm	ノズルより 86 mm 離す, ただし 50 mm 軸外し点	200°C	{ 軸外し点をねらったため, {着火時の温度急上昇なし†
# 5	~9 cm	ノズルより 86 mm 離れた点を, 遠隔操作で噴流軸に垂直に 60 cm, 燃焼中に移動させて, 温度分布を見る	スケールアウト	{ RM 4 個が同時に燃焼しているため, 相互の干渉があり, 火炎幅も大きい. 温度 {ほぼ一定
# 6	~9 cm		400°C	

† VTR 録画によると噴流軸上では, 着火直後にはノズルから幅の狭い光輝部が前方まで連続的に走っているが, 時間経過とともにノズルから第 1 そろばん玉までは明るさが薄れる. 一方軸外し点では明るさがこのようには変化しない.

b) 各種光学観測

VTR 2 台, 8mm カメラ等を用いて数 torr の減圧下でのロケット火炎の拡がり [3] を観測した. ソニー製 VCK-2100 に赤外域も感光する浜松テレビ製 N-157 を取付けたビデオカメラで撮影すると燃焼中に火炎は最大幅 20 cm 程度に拡がり, 第 1 そろばん玉の中心部はノズルより約 30 cm 後方に現われるが, 燃焼が進むにつれて, 槽内圧が上昇するため, 火炎も縮小されて, そろばん玉がノズル側に近づいて行く様子がはっきりと認められた*.

また, フライト時においては, CN 側からフォトランジスタ PD-3L で RM の作動を確認することになっているので, その試験も行なったが, ノズル斜後方 5.5m の所からも噴射を確認し得た**.

* 倉谷研哉山担当

** 林研松下通信担当

5. ガス分析と理論性能*

a) RM #6 でレトロモータ 4 個を同時燃焼したときの発生気体を、あらかじめ真空に排気した内容積 10 l のガスだめにとり、質量分析計、ガスクロマトグラフを用いて分析した。はじめに質量分析計(日本分光製 MS-10)により、生成気体中には HCl, H₂O がほとんど含まれていない(ガラス容器の器壁に吸着されたものとみられる)ことが判明したので、残る H₂, N₂, CO, CO₂ (および空気混入による O₂) の分析をガスクロマトグラフを用いて行ない、次の結果を得た。[() 内は質量分析の値]

H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	計
25.9(26.3)	5.0	28.9	29.1	8.5(8.2)	97.4%

一方使用推薬 UP-25 は燃料過剰であるので、上記分析値中の O₂ は空気の混入による (50 m³ の真空槽の初圧が 1 torr であり、当然空気が混入している) とみられるので、その補正を加え各元素についての質量バランス

$$\text{CO} + \text{CO}_2 : \text{N}_2 = 3.87 : 1$$

$$\text{HCl} : \text{N}_2 = 1.93 : 1$$

$$\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} : \text{CO} + \text{CO}_2 = 1.70 : 1$$

の関係を用いると RM の排気ガスの組成は、百分比に換算して

H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	HCl
19.7	0	7.7	22.2	6.5	29.0	14.9%

となる。そこで水性ガス平衡の平衡定数をこの分析値をもとに算出すると

$$K = \frac{[\text{H}_2\text{O}][\text{CO}]}{[\text{H}_2][\text{CO}_2]} = 5.02$$

が得られ、2080°K の平衡定数と一致する。

一方、使用推薬 UP-25 について理論性能を計算すると、50 気圧では燃焼室温度 2408°K に達し、膨脹比 3.5 で噴射されたときには、ノズル内で生成気体の平衡が

凍結されているとして 排気温度 1300°K

移動していくとして " 1336°K

と求められる。したがって、ガス分析の結果からは燃焼室温度 T_c にむしろ近いこととなり、それゆえノズルで膨脹する間には平衡は凍結していると近似した方が良さそうである。

この事実は、従来からわれわれの考えている説、すなわち、小型エンジンでは、化学平衡はノズル通過の際に凍結していると近似し、大型エンジンでは平衡は移動して行くことと近似するのが良いというものとも一致している。

b) レトロモータと同型のデスピニンモータについて、膨脹比 $\varepsilon = 43.5$ で真空燃焼実験(真空度 4.5 torr → 20 torr) が行なわれ、 $I_{sp} = 238 \text{ sec}$ の値が得られているから、これと膨脹比 3.5 のレトロモータの比推力値を

* 倉谷研, 倉谷, 荻原担当

$$I_{sp}(\varepsilon 3.5) = I_{sp}(\varepsilon 43.5) \cdot \frac{C_F(\varepsilon 3.5) \Gamma(\varepsilon 43.5)}{C_F(\varepsilon 43.5) \Gamma(\varepsilon 3.5)}$$

$$C_F = \Gamma \sqrt{\frac{2\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}-1} \left[1 - (P_e/P_c)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}} \right] + \frac{A_e}{A_t} \left(\frac{P_e}{P_c} - \frac{P_a}{P_c} \right)}$$

$$\Gamma = \sqrt{\bar{\gamma}} \left(\frac{2}{\bar{\gamma}+1} \right)^{\frac{\bar{\gamma}+1}{2(\bar{\gamma}-1)}}$$

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{2}(\gamma_c + \gamma_e)$$

の関係を用いて比較してみよう。ここに γ_c , γ_e は燃焼室内およびノズル出口での気体の比熱比を示している。

上に述べた事実から、小型モータでは膨脹過程で平衡が凍結されていると近似する方がよいことが明らかとなったから、平衡凍結として理論計算を行なうと

燃焼室内	P_c 50 kg/cm ²	T_c 2408°K	γ_c 1.240					
排 気	A_e/A_t P_e/P_c	T_e	γ_e	$\bar{\gamma}$	C_F	Γ	P_a	
	3.5 21	1300°K	1.275	1.257	1.564	0.6593	5~20 torr	
	43.5 763	680	1.340	1.290	1.773	0.6655	12 torr	

と求められるから、 $A_e/A_t=3.5$ のレトロモータの比推力は今回の実験条件下では 212sec と算出され、表 2 に示した比推力の荷重平均値 211sec とよい一致を示す。

参 考 文 献

- [1] 五代富文, 岡部裕二郎, 清水昭紀, 伊藤克弥, 西村久男, 航空宇宙技研資料 TM-203 (1971).
- [2] 雛田元紀, L-4S のレトロモータについて, 69.12.3 および 69.12.15 のメモ
- [3] 大島耕一, 宇宙航行の力学シンポジウム (昭和 45 年 11 月東大宇宙研) にて高空でのロケット火炎の拡がり論じられた。