

ロケットモータおよび点火器

倉谷 健治・秋葉 鎌二郎

まえがき

L-4T-1, L-4S-4, L-4S-5 に使用されているエンジンを L-4S-3 と比較したものが表 1-1 である。同表に示されているように、その大部分は報告済みであるので、ここでは未発

表 1-1

エンジン	L-4S-3 との相異点	該当地上燃焼実験
B ₁ 735 ³ / ₃	L-4S-3 と同じ	735 ³ / ₃ -2 ²⁾
B ₂ 735 ¹ / ₃	L-4T-1 以降でスロート径が 157φ→153φ へ	735 ¹ / ₃ -3 ²⁾
B ₃ 500	L-4T-1 以降でスロート径が 111φ→107φ へ	500-2 ¹⁾ (ただし D _t =117φ)
メイン 480 S	L-4S-3 BP-12 推薬 L-4T-1 BP-17 推薬 L-4S-4,5 BP-17 推薬	480S-3 ¹⁾ 480S(T)-2 ²⁾ 480S—スピン—5 ²⁾
SB 300-SB	L-4S-5 はスライバー除去の 300-SB (改) へ	300-SB (改) 本文
スピン スピンモータ	L-4S-3 と同じ	1)
DS デスピンモータ	L-4S-3 と同じ	1)
RS レスピンモータ	L-4S-3 と同じ	1)
RM レトロモータ	L-4S-5 より L 用 デスピンモータを転用	別報

表の補助ブースタの燃焼試験の結果について述べる。また、L-4S-3 から L-4T-1 へ移る間に、点火器は従来の TAS 系から NAB 系へ切換えられ、その開発経過もすでに報告したが、その後のエンジン組込試験の結果をここで述べておく。L-4S-5 では、このほか補助ブースタ切離しが X+8.0sec に設定され、しかも切離しまえに燃焼が完了していることという規制が加えられたので、延時管にも検討を加え、補助ブースタも改造された。

1. L-用補助ブースタ 300-SB (改)

はじめにフライト時における全燃焼秒時 t (全) を予測するために、検査成績表に記載されている環境圧 50 kg/cm² 下でのストランド法による燃速値 r (通常は V_b^{50} と表わすが便宜上 r で表わしておく) と地上燃焼実験における t (全) との相関を直線回帰法で調べた。実験値は表 1-2 に示されているが、燃速の次には検査成績表記載値と、燃速の温度係数とから、実験時の薬温における燃速値に修正した値を記入してある。

いま、第一近似として t (全) は web/r の関数とみると、 t (全) と $1/r$ の関係を図示

表 1-2

	t (全)	燃 速 r	薬 温
300-SB-2	7.40 sec	6.40 mm/sec	12°C
3	7.68	6.05	21
4	7.75	6.11	16
300-SB-TVC	7.80	6.18	

した図 1-1 より, 直線回帰は

$$t(\text{全}) = (a/r) + b$$

の形に置き得る. 上記 4 測定値より, 各係数を最小二乗法で求めると, $1/r$ に sec/cm 単位を用いれば

$$t(\text{全}) = (3.6177/r) + 1.8048 \quad (1)$$

がえられ, 全燃焼秒時の標準偏差も $\sigma_2 = 0.132$ sec ($\sigma/\bar{X} = 1.65\%$) と求められる.

一方, 補助ブースタ切離しには 8.0 sec の

延時管が用いられるが, 後述のようにその標準偏差は, ばらつきによる項と, 温度感度の項とが合成されて $\sigma = 0.235$ sec と見積られている. しかし, 温度感度の項は, 補助ブースタの温度感度と同程度の大きさであり, しかも両者は相殺されるから, 今の場合には, 延時管のロット内標準偏差のみを用いる方が妥当とみられ $\sigma_1 = 0.125$ sec とおける. それゆえ

$$T(\text{延時秒時}) - t(\text{全燃焼時間})$$

の標準偏差 σ は, σ_1, σ_2 がそれぞれ独立とみなせば

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 0.125^2 + 0.132^2 = 0.181^2$$

と推定され, $(T-t)/\sigma$ で規格化すれば, 正規分布を仮定して, 補助ブースタ切離しまえに燃焼が終了していない危険率 ε をもただちに求められる. たとえば, 今までの補助ブースタ切離し例について試算すると

	推 薬 燃 速	t (全)	切離し秒時	危 険 率
L-4S-2	6.07 mm/sec	7.765 sec	8.0 sec	10%
	6.01	7.824		17%
L-4S-3	6.44	7.422	8.0	1%以下
	6.44	7.422		1%以下
L-3H-3	6.15	7.687	8.0	4%
	6.27	7.394		1%以下

がえられる. しかるに, これらの飛しょうはいずれも順調であったから, L-4S-2 号機程度までの燃速を合格の下限と規定することができる.

しかし, このことは現在 (44 年 3 月頃) までに製造されている UP-10 推薬のロット間

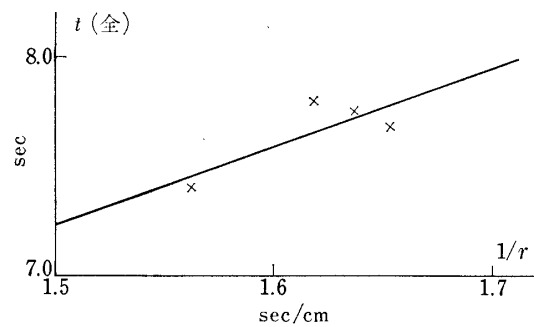


図 1-1

の平均燃速および標準偏差*が

$$5.97 \pm 0.161 \text{ mm/sec}$$

であることと考え合わせると危険率がかなり高くなることを意味している。そこで、確実に補助ブースタの燃え切り秒時を下げ的方法としてスライバー除去案を採用することとした。

スライバー除去案とは図1-2に示すスライバー部（ハッチした所）の推薬を除き、代わりにポリウレタンを充填したもので、スライバー燃焼期を極小化し、全燃焼秒時を短

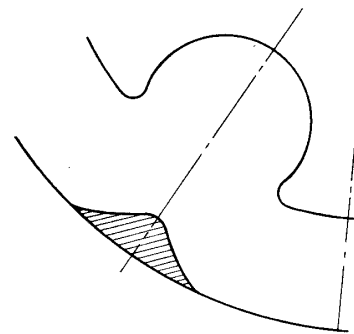


図 1-2

表 1-2 300-SB の地上燃焼成績 (大気圧燃焼)

No.	1	2	3	4	TVC フレオン5	300-SB 改
チャンバー	クロモリφ39	〃	〃	〃	〃	〃
推薬	UP-10	UP-10	UP-10	UP-10	UP-10	UP-10
中子形状	300-1,2,2	300-4,5,6	300-4,5,6	300-4,5,6	300-4,5,6	300-4,5,6 スライバー除去
薬長	4689	4687	4685	4686	4687	4580 mm
薬径	300	298	298	301	298	298.8 mm
薬量	323.3	342.0	341.3	341.0	339.85	312.9 kg
ノズルスロート径	160	160	160	160	160	160 mm
Ae/At					7.0	3.5
K _N	235	242	242	242	242	240
最大内圧	46.2	55.5	56.8	56.0	52.5	53.3 kg/cm ²
75% 平均内圧	42.3	47.7	45.8	46.0	46.0	43.5 kg/cm ²
最大推力	12,970	14,330	13,950	13,790	13,900	13,800 kg
75% 平均推力	12,390	13,530	13,030	13,010	12,900	12,600 kg
有効燃焼秒時	4.76	5.00	5.00	5.11	5.07	4.97 sec
全燃焼秒時	7.63	7.40	7.68	7.75	7.80	6.22 sec
比推力	220	219	219	220	218	220 sec
点火器	TAS 291 gr	TAS 291 gr	TAS 291 gr	TAS 291 gr	TAS 291 gr	NAB 322 gr
薬温	11.5°C	12°C	21°C	16°C		30°C
日付	66. 1.15	66. 3.11	66. 4.24	66. 5. 3	67. 6.15	69. 7.18
備考		SB 飛しょう 用推力曲線				
推薬抗張力	22.1	14.3	14.2	14.6	14.1	11.6 kg/cm ²
伸び率						>50 %
燃速	6.70	6.45	6.04	6.13	6.27	6.14 mm/sec
	製造工程が異なるので図 1-1 では除外してある					

* 薬量あたりの重率を加味して計算したもの。

かくしようとするものである。実際にこの型式の補助ブースタ 300-SB(改) について地上燃焼実験した結果では燃速 6.14 mm/sec の推薬を用いて $t(\text{全})=6.22\text{sec}$ を得た。図 1-3 には

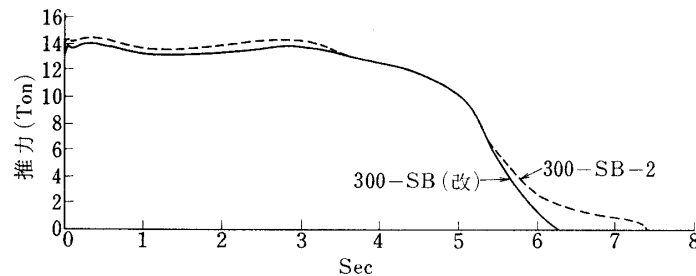


図 1-3

比較のため 300-SB-2 および 300-SB(改) の推力—時間曲線を合わせ示し、表 1-2 に補助ブースタに関する地上燃焼実験の結果をまとめておく。

2. 点 火 器

L-4S-3 号機 3 段目の不点事故以来、その原因追求と新型点火器の開発に努力し、新しくホウ素—硝酸カリウム系 NAB ペレット点火器および点火モータの開発を終わった。このうち、L-4T-1, L-4S-4, L-4S-5 および M-3D-1 の各段エンジンには NAB ペレットを FRP ケースに収めた点火器を用い、M-4S-1 以降で点火モータを採用している。これら新型点火器の詳細のうち確認試験終了までの経過についてはすでに報告したが [3], その後何回か、エンジンに組込んで最終確認のための地上燃焼実験が 44 年 12 月までに相次いで行なわれているので、それらについて報告する。

始めに、われわれが使用した各種の点火器を同一尺度で統一的に比較してみよう。それには、点火器からはある秒時の間一定の出力が得られるとし（言い換えれば、点火器圧 p_{ig} がこの間一定であるとし）、その単位時間当りの発生熱量率 \dot{Q} kcal/sec を基準にとるのがよいと思われる。NAB ペレット、点火モータでは点火器圧がある秒時の間一定であるので上述のように取扱っても問題は生じないが、TAS ペレットでは点火器の初期圧が著しく大きく、末期では単にすそを長くひいてに過ぎないので、最大圧の 1/10 に達する点までを有効秒時 t_{eff} とし、この間に燃焼した薬量を $\int_0^{t_{\text{eff}}} W dt \propto \int_0^{t_{\text{eff}}} P dt$ と考えて算出する。それゆえ、有効燃焼秒時中はいずれの点火器でも、点火器圧一定で燃焼するとし

$$\dot{Q} = C \cdot W_{\text{eff}} / t_{\text{eff}}$$

で基準となる発生熱量率を求める。ここに C は

TAS ペレット 2000 cal/g; NAB ペレット 1900 cal/g; 点火モータ 1350 cal/g

で、点火薬の g 当りの発生熱量である。

次に地上燃焼実験において点火器背後より点火器圧 p_{ig} 、主エンジンに通ずる導孔よりチャンバ内圧 p_c をそれぞれ独立に測定し得たとすると、点火器自体もスキブに通電してから点火器圧が立上るまでに若干の遅れをもっているから、図 2-1 に示すような圧力—時間曲線

表 2-1 i) 各種エンジンの点火おくれ

実験名称	点火器	点火薬量	有効秒時	有効薬量	\dot{Q}	$\tau_{pc}-\tau_{ig}^*$	備考
a. 真空点火 (クロージャなし, 真空槽内で点火)							
500 B ₃ 点火実験 #6	TAS	150 ^{gr}	100 ^{ms}	130 ^{gr}	2600 ^{kcal/sec}	44-5 ^{ms}	
" #7	TAS	100	100	77	1540	79-5	
" #4	TAS	50	80	37.3	930	不点火	
500 B ₃ 点火モータ #5	点モ $\phi=1/2$	650	1000	650	880	146-10	
" #1	" $\phi=1/4$	350	900	350	525	246-5	
" #2	" $\phi=1/4$	350	900	350	525	322-5	推進表面 無処理
735 ^{1/3} -TVC-1	点モ $\phi=1$	2650	1000	2650	3580	155-20	"
480 S-スピン-5	NAB-4	43.9	170	43.9	490	27	
b. クロージャ付き真先槽内点火							
500 B ₃ 点火実験 #3	TAS	100	100	77	1540	23-5	
" #5	TAS	150	100	130	2600	26-5	
" #2	TAS	200	120	194	3240	22-5	
500 B ₃ 点火モータ #1	点モ $\phi=1/2$	650	1000	650	880	40-13	
" #2	点モ $\phi=1$	1250	1000	1250	1690	32-17	
" #3	"	1250	1000	1250	1690	32-18	
" #4	"	1250	1000	1250	1690	32-17	
500 B ₃ -TVC-1	NAB-2	153	100	150	2850	26-2	
480 S-スピン-4	NAB-4	43.1	170	43.1	482	13	
480 S(T)-2	NAB-4	43.9	170	43.9	490	7	
c. 大気圧点火							
500 B ₃ -TVC-ループ	点火モータ	1250	1000	1250	1690	123-22	推進表面 無処理
735 ^{1/3} -3	NAB-4	316	180	303	3200	90-12	
735 ^{3/3} -2	NAB-4	832	190	808	8080	117-14	
300-SB(改)	NAB-4	322	180	322	3400	70-15	
480 S-FRP-1	NAB-4	27.9	170	27.9	310	27	

* TAS ペレットの $\tau_{ig}=5$ ms とおいた。

表 2-1 ii) 小型エンジン (空洞容積 1.44 l) の真空点火 (クロージャなし)

点火器	点火薬量	有効秒時	有効薬量	\dot{Q}	τ^* UP-10 に対し	τ^* BP 17 に対し
NAB-2	11.82 g	80 ms	11.28 g	265 kcal/sec	70, 56	69 ms
TAS	13.32	80	12.64	291		67
TAS	19.68	100	18.82	343	45, 47	50, 38
TAS	25.74	80	25.00	569	18, 8	17, 10
NAB-2	16.98	90	16.90	355	28, 39	38, 50
NAB-2	22.14	80	21.66	512	19, 19	

* $\tau_{ig}=2$ ms とおいて $\tau=\tau_{pc}-\tau_{ig}$ として示した。

がえられ、それぞれの点火おくれ τ_{ig} , τ_{pc} は立上り部の傾斜を $p=0$ まで外そうすることによって求められる。

主エンジンの点火に要する時間は点火器からの熱量のほかに、主エンジンの推薬表面積、推薬表面の処理状況、主エンジンの初期環境圧等に左右される。したがって実験結果を整理する際にも真空点火（クロージャなし）真空点火（クロージャ付き）大気圧点火に分けるのが妥当で、表 2-1 にはこれらの実験結果が示されている。他種エンジン間の点火おくれを比較するには、

発生熱量率 \dot{Q} を推薬表面積で割って規格化するのがよいが、表 2-1 の中で同種エンジンについての実験例の多い 500B₃ 小型エンジン ($V_0=1.44l$) を取り出して \dot{Q} との関係を図 2-2 にプロットした。その結果 500-B₃ エンジンの真空点火では

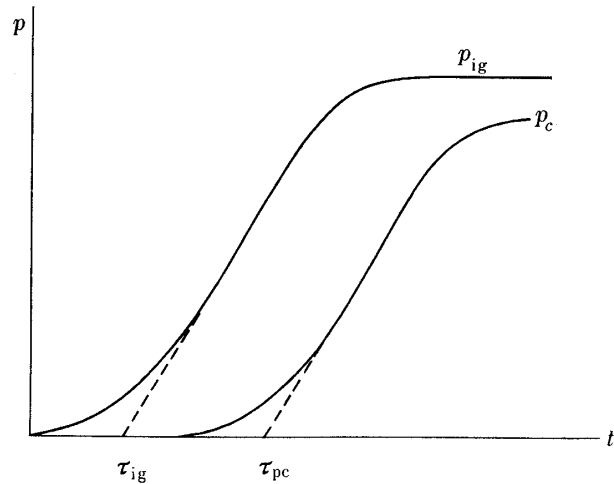


図 2-1 点火おくれの定義

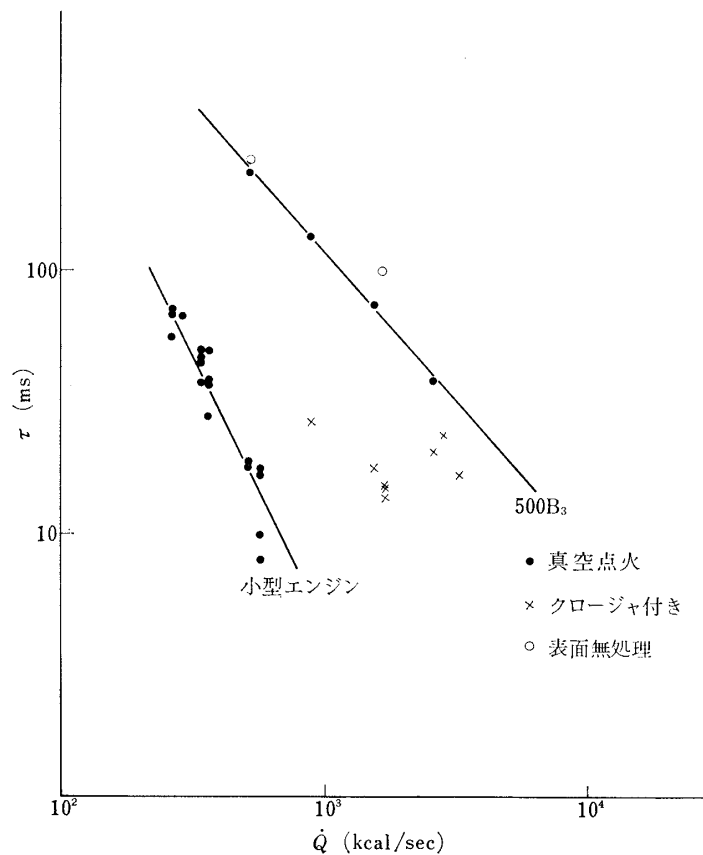


図 2-2 点火おくれと発生熱量率

$$\log \tau = a_1 - 1.12 \log \dot{Q}$$

$V_0 = 1.44 l$ の小型エンジンでは

$$\log \tau = a_2 - 2.05 \log \dot{Q}$$

はこの関係が得られるが、クロージャ付き真空槽内点火ではこのような簡単な関係は導き出せない。

一方、表 2-1 から導き出せる結論は

i) 500 B₃ 点火実験 #4 が不点火に終わったのは $\dot{Q} = 930 \text{ kcal/sec}$ であるから 110 ms で点火すると予想されるが、実際には 80 ms で点火器が燃えつきってしまったためとみられる。

ii) エンジンにノズルクロージャを付けて真空槽内で実験すると、点火後しばらくはクロージャが離脱しないので、エンジン内圧は高くなり、推薬面への伝火が容易となるため点火おくれはきわめて短い。これに対し、ノズルクロージャなしの真空槽内点火では、初期環境圧が小さくしかも内圧は蓄積されないので点火おくれは大きくなる。興味のあるのは大気圧燃焼でノズルクロージャを付けない場合も、真空点火のときと同様に点火おくれが長いという事実である。すなわち、クロージャを付けるということは単にエンジンの初期内圧を大気圧に保っているということではなく、点火後しばらく数気圧の圧力を保ち得るということが点火の見地からは大きな意味をもつものといえ、大気圧点火（クロージャなし）とは意味を異にするものである。

iii) 直填方式でチャンバに推薬を詰め、中子を抜き去ったあと、離型剤をふき取ったままの推薬表面無処理の場合には点火おくれは一般に長くなる。今後、直填方式が主流となることを考えると点火薬量にも細心の注意が必要となる。

最後に L-4T-1~L-4S-5 に用いられている NAB-4 ペレット点火器の能力を表 2-1 の結果からまとめ、点火器有効秒時を点火おくれで割ったものを安全率と定義すれば

735 ³ / ₃	735 ¹ / ₃	300-SB	500 B ₃	480 Sエンジン
1.6	2.5	2.5	3.2	6.3安全率
735 ³ / ₃ -2	735 ¹ / ₃ -3	300-SB(改)	図 2.2 より	480 S-スピン-5.....該当地上試験

と求められる。ここで 500 B₃, 480 S については、最悪の事態を想定して、クロージャが何らかの偶発事故で早期にはずれて真空点火となった場合の安全率を求めるため、真空点火での点火おくれを有効秒時と比較した。

3. 延時管の標準偏差

延時管は現在多段ロケット内に広範囲に使用されている。たとえば補助ブースタの切離しにおいては、その時刻精度と同時性が、レトロモータ点火においてはその同時性が要望される。たまたま、L-4S-5 号機において、補助ブースタの切離しが正確に 8.0 sec と規定されたこと、およびレトロモータ用延時管が領収試験において $6.0 \pm 0.3 \text{ sec}$ の規格からはずれて 4.9 sec で作動するものが 1 個見出されたことなどがあって、延時管の標準偏差、温度感度、環境試験に対する耐性等を検討し直した。測定法は別記しない限り、日本油脂川越工場て点

火玉発火時間電流時間規制装置を用いた.

3.1 同一ロット内の標準偏差

a) 4.9sec という異常の発生したものと同一ロットについて,

$$n=5, \bar{X}=5.79, \sigma=0.118, \sigma/\bar{X}=2.04\%$$

b) この原因究明のために 6sec ものを正規の製造条件で試作. その一部は振動試験にかけられたが, その影響は認められないので, これらをまとめると,

$$n=8, \bar{X}=5.56, \sigma=0.081, \sigma/\bar{X}=1.46\%$$

c) 在庫の 5sec ものについて

$$n=15, \bar{X}=5.11, \sigma=0.084, \sigma/\bar{X}=1.64\%$$

d) 5sec ものについて, 別個に再現性テストが行なわれていたが, その結果は

$$n=8, \bar{X}=5.13, \sigma=0.057, \sigma/\bar{X}=1.10\%$$

であった. これらの結果を見ると, 同一ロット内では標準偏差はきわめて小さく, Pollard, Arnold [4] が最良の条件下で約 3% の相対標準偏差が起り得るとしているが, その値よりも小さい.

3.2 環境試験

a) 熱衝撃試験 6.0sec ものにつき, まず参照用に 11°C で 2本の延時秒時 5.87, 6.00 sec を確かめ, 次に温度感度を求める意味で -50°C に 2時間放置後, ただちに測定した結果 6.70, 6.83sec であること, いいかえれば 0.22%/°C の温度感度を導いたあと, 残る 5本につき

$$+60^{\circ}\text{C}, 2\text{hr} \rightarrow -50^{\circ}\text{C}, 2\text{hr} \rightarrow +60^{\circ}\text{C}, 2\text{hr} \rightarrow -50^{\circ}\text{C}, 2\text{hr}$$

の温度サイクルをかけ, -50°C で延時秒時を実測すると

$$n=5, \bar{X}=6.80, \sigma=0.300$$

で, 熱衝撃には十分耐えることを確かめた. (ただし分散はやや大きい).

b) 放射能試験 Co 60 で 70 時間, 5sec ものに照射した結果は 5.06, 5.10sec で, このロットの平均値と一致しており, 影響は見られない.

c) 振動試験* 次の振動数と荷重を負荷したあと延時秒時を, フォトトランジスタによる光の検出, ダイナミックスピーカによる音の検出によって求めた. これらセンサからの電気信号はビジュグラフに記録して, 点火マークからの時間間隔を, 同時記録した 100 Hz の波の数から求めた.

負 荷 条 件	延 時 秒 時
150 Hz, 30 G, 12 sec; 400 Hz, 30 G, 7 sec; 800 Hz, 30 G, 14 sec:	5.12, 5.24 sec
150 Hz, 6 G, 12 sec; 400 Hz, 6 G, 7 sec; 800 Hz, 6 G, 14 sec:	5.12, 5.09 sec
150 Hz, 30 G, 18 sec; 400 Hz, 40 G, 10 sec; 800 Hz, 40 G, 22 sec:	5.15, 5.16 sec

上表の結果は供試延時管は振動試験に十分耐えることを示しており結局環境試験にはいず

* 今沢, 吉山, 若原, 南の各氏の応援を得て, 日産, 日本油脂関係者立会いのもとで行なった結果である.

れも合格している。

3.3 結語

以上の結果を総合すると、ロット内の偏差は小さいが、 $6.0 \pm 0.3 \text{ sec}$ の規格で作ったものについても1-aの5.79sec, 1-bの5.56secとかなり大きいロット間偏差がみられる。問題のロットは領収試験時および1-aの結果からは $\bar{X} = 5.79 \text{ sec}$ であるが、このもののみ、ロット内の偏差もやや大きいことも合わせて考えると、あるいはこのロットの平均値が1-bに近い5.60sec付近でしかも 3σ 近くずれたものにたまたま遭遇したと見られるが、これはきわめてまれな場合で、今回の異常の的確な原因を究明し得たとは考えられない。

次に補助ブースタに使われる延時管は8.0secもので、その標準偏差 σ は、同一ロット内での偏差 σ_1 と、 $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度の温度差内で使用される場合を想定して、温度感度にもとづく偏差 σ_2 とより $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ で求められるとすると、 σ_1, σ_2 はそれぞれ0.125*, 0.176secであるから、8secものの延時秒時は $8.0 \pm 0.235 \text{ sec}$ とみなされる。

終わりに実験に協力を頂いた宇宙研、日産自動車宇宙航空事業部、日本油脂川越工場の実験班の方々に厚く謝意を表す。

1972年5月8日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 倉谷健治, 秋葉鏝二郎, 宇宙研報告 4, No. 4 (B), 625 (1968)
- [2] 倉谷健治, 秋葉鏝二郎, 岩間彬, 長友信人, 宇宙研報告 8, No. 3 (B), (1972)
- [3] 倉谷健治, 宇宙研報告, 4, No. 4 (B), 644 (1968)
- [4] F. B. Pollard, J. H. Arnold, Jr., "Aerospace Ordnance Handbook", p. 264 (1966), Prentice-Hall Inc.

* $\sigma_1/\bar{X} = 1.56\%$ とした。