

UDC 621.453/.457.01:  
621.454.2

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-364

## Nロケット第2段用LE-3型エンジンの高空性能試験

大塚 貞吉 ・ 山田 晃 ・ 宮島 博  
日下 和夫 ・ 黒田 行郎 ・ 熊谷 達夫  
木皿 且人 ・ 阿部 登 ・ 鎌田 真  
佐藤 政裕 ・ 植野 孝

1978 年 8 月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# Nロケット第2段用LE-3型エンジンの高空性能試験\*

大塚 貞吉\*\* 山田 晃\*\*\* 宮島 博\*\*  
日下 和夫\*\* 黒田 行郎\*\* 熊谷 達夫\*\*  
木皿 且人\*\* 阿部 登\*\* 鎌田 真\*\*  
佐藤 政裕\*\* 植野 孝\*\*

## 1. ま え が き

LE-3型エンジンは、技術試験衛星「きく」および「きく二号」、ならびに電離層観測衛星「うめ」および「うめ二号」の打上げに成功したNロケット第2段用として開発が進められたもので四酸化二窒素/エアロジン-50 (NTO/A-50) の自燃性推進薬組合せを用いるガス押し方式、管構造再生冷却液体ロケット・エンジンである。このような上段用エンジンの開発にあたっては、各種の高空性能シミュレーション試験を行なうことが要求される。

この報告は、当所角田支所に設置されたロケット・エンジン高空性能試験設備を用い、昭和48～49年度に、LE-3型エンジンについて設計確認試験および認定試験など約40回の高空性能試験を実施した結果を整理したものである。

## 2. 供 試 体

供試体の形状および公称性能は図1、表1に示すようなものであり、構造上の要点を以下に示すが、詳しくはNASDA・技術報告<sup>1)</sup>に示されている。

- (1) 燃焼室は管式構造で、燃料による再生冷却およびフィルム・クーリングが行なわれている。
- (2) スペーサはFRPライニングのアブレーティブ・クーリング方式のものである。
- (3) スカートはコロンビウム合金製の輻射放冷型のものであり、肉厚が薄く非常に軽量化されている。
- (4) インジェクタはアルミニウム合金製の異種2噴流衝突型である。

昭和48年度に試験されたエンジン(2台、この内の1台は予備試験に使用)は原型エンジンである。昭和49年

度に試験されたエンジン(8台)は燃焼振動を抑制するため、インジェクタの噴射パターンに改良が加えられており、現在Nロケット第2段に搭載されているものと同型のものである。

## 3. 試験設備および操作

本試験は当所に設けられたロケット・エンジン高空性能試験設備を用いて行なわれた。この設備の主要部およびデータ取得システムの概要は、それぞれ図2、3に示すようなものであるが、これらの詳細は典型的な操作方法なども併せて航技研報告<sup>2)</sup>に示されている。したがって、ここではLE-3型エンジンの試験のために配慮された操作上のおもな事項に限ることとし、以下にこれを述べる。

すなわち、試験装置の操作に関しては次の措置がとられた。

表1 LE-3エンジンの主要諸元および公称性能

エンジン の 諸 元			
燃 焼 室 内 径	300	mm	
特 性 長 さ	710	mm	
ス ロ ー ト 径	185	mm	
ノ ズ ル 出 口 径	943	mm	
膨 脹 面 積 比	26	—	
ノ ズ ル 形 状	80 % Bell		
公 称 性 能			
推 力 (真 空 中)	5440	kg	
比 推 力 (真 空 中)	>285	s	
燃焼圧力(噴射器端)	11.64	kg/cm <sup>2</sup> , abs	
O/F 混 合 比	1.500		
O <sub>X</sub> 流 量	11.30	kg/s	
F 流 量	7.53	kg/s	
O <sub>X</sub> インタフェイス圧力	20.0	kg/cm <sup>2</sup> , abs	
F インタフェイス圧力	20.2	kg/cm <sup>2</sup> , abs	

\* 昭和53年7月27日 受付

\*\* 角田支所

\*\*\* 宇宙研究グループ

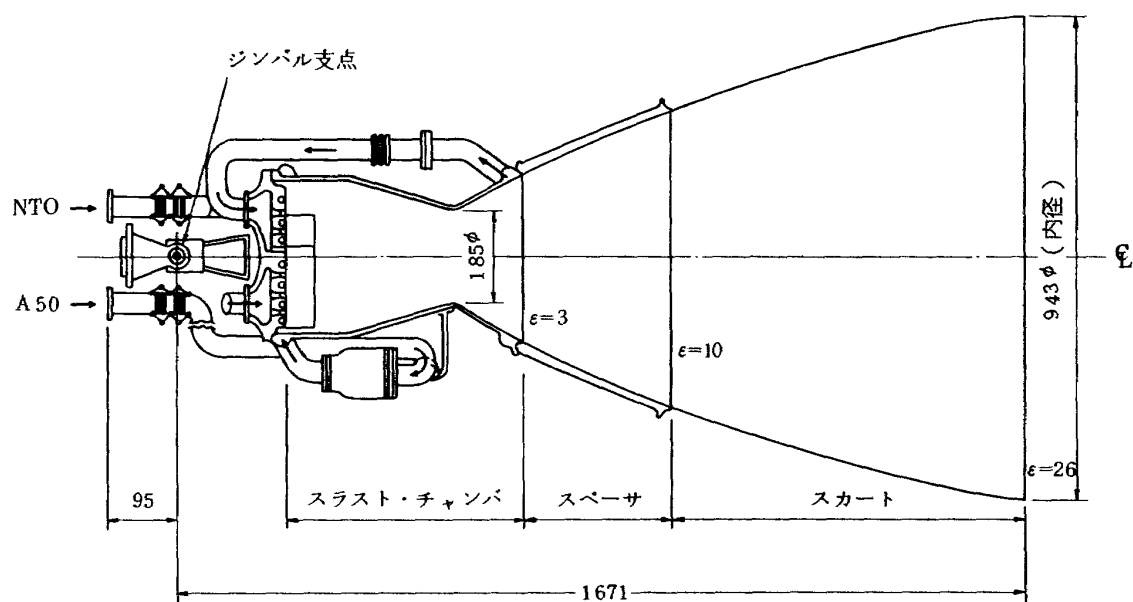


図1 LE-3エンジンの概要

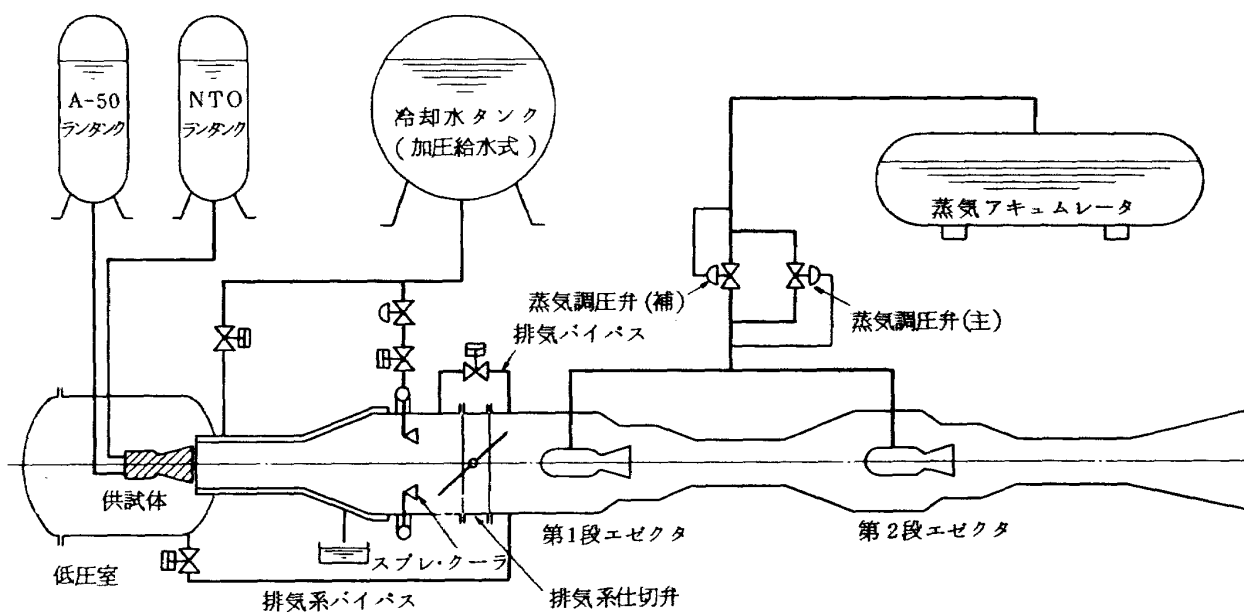


図2 試験設備の系統

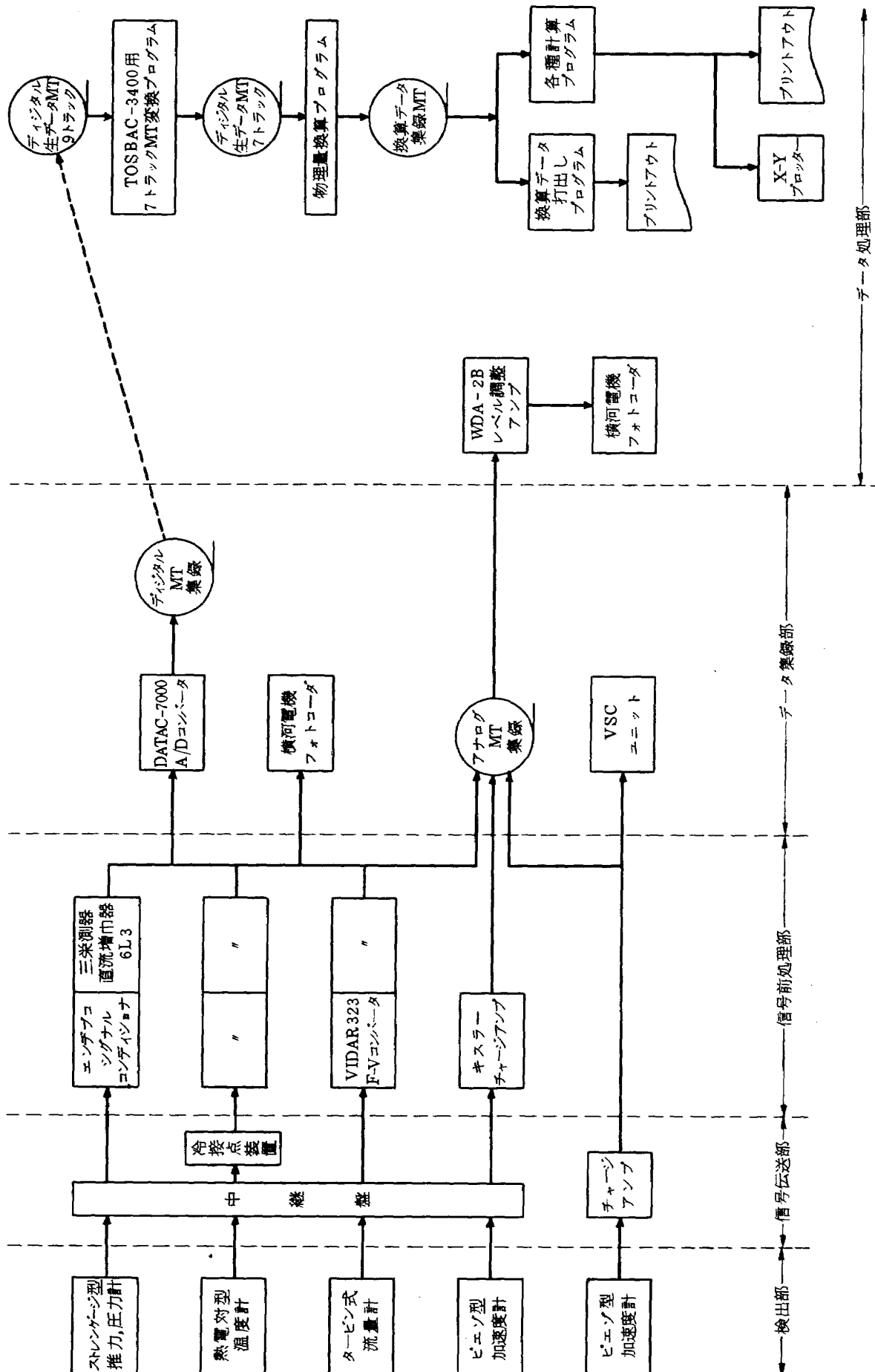


図 3 HATS 計測ブロック図

- (1) エゼクタの起動に際して、低圧室を急激に吸引すると、ロケットの実際の飛しょうではあり得ないことであるが、ノズル内の圧力が低圧室の圧力より低くなり、ノズル・スカートに設計外の過大な外圧がかかり、スカートの座屈を引き起す危険が予想された<sup>3)</sup>ので、先づ、バイパス・ラインにより低圧室を減圧し、低圧室圧力が 80 torr 以下となったところで排気系仕切弁を開くサブ・シーケンスをスタートした。
- (2) エンジン始動の際の過大な点火ピークとそれに伴う振動を避けるため、始動前のランタンク圧力を設定圧力よりも 2～3 kg/cm<sup>2</sup> 低い状態にセットし、エンジンの始動とともにタンクの加圧弁を開き、調圧を開始する手段（ブローダウン・モードの始動）をとった。
- (3) エンジンの過大振動に対する安全策として設けた自動停止装置（VSC 装置）の設定値は、推力軸方向の振動に対して 150 g・rms×150 ms とした。
- (4) 供試エンジンは実機型そのものであり、エンジン始動弁を始め、バージ弁その他の所要の弁類およびこれらの制御機器が装備されているので、エンジンの作動に関しては設備側の制御機器を用いることなく、単に、始動信号と停止信号をエンジン側に与えるだけとした。
- (5) 当所のエゼクタでは、4つの基本的な作動様式が考えられているが、この試験では第1段および第2段エゼクタを同時に駆動し、かつ、エゼクタ駆動用蒸気の調圧を 12.5 kg/cm<sup>2</sup> G とする方式とした。

一方、計測操作に関しては、その精度を確認するため、各シリーズの試験の開始に先立って、検出器類を計測システムと組合せる通常の END TO END の較正を繰り返し行ない、物理量換算係数（キーンバ、KN）を定めるほかに、繰り返し較正の KN のバラツキから計測項目毎の精度を推定した。

ここで、KN は次式で示されるものであり、図 4 のパターンの較正を数回繰り返し、その平均を用いた。

$$KN = (V_F - V_0) \cdot (Z_i - Z_0) / (V_i - V_0)$$

$$Z_m = [(V_m - V_0) / (V_F - V_0)] \cdot KN + Z_0$$

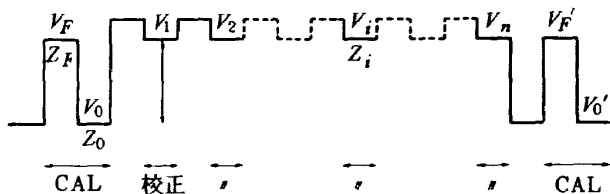


図 4 インプレース校正のパターン

但し、 $V_F$  = CAL 第 1 ステップの出力電圧

$V_0$  = CAL 第 2 ステップの出力電圧

$V_i$  = 印加物理量に対応する出力電圧

$V_m$  = 計測データの出力電圧

$Z_F$  = CAL 第 1 ステップに相等する物理量

$Z_0$  = CAL 第 2 ステップに相等する物理量

$Z_i$  = 印加物理量

$Z_m$  = 計測の物理量

また、総合精度は次式によった。

$$P_r = \left[ A_1^2 (100 t)^2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n E_{ij}^2 + A_3^2 C_T^2 \right]^{1/2}$$

但し、 $t$  : スチューデントの  $t$  分布の 95% 信頼度レベルの値、自由度は  $m(n-1)$

$n$  : キーンバ測定時のステップ数

$m$  : キーンバ測定を行った回数

$$E_{ij} = \frac{V_{ij} - V_{0j}}{V_{Fj} - V_{0j}} - \frac{Z_{ij} - Z_{0j}}{KN_j}$$

$$A_1 = \overline{KN} / S_R$$

$$\overline{KN} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m KN_j$$

$S_R$  : テストで要求されるシステム・レンジ

$C_T$  : 基準器の精度, %FS

$$A_3 = S_T / S_R$$

$S_T$  : 基準器のレンジ

本試験における推進薬供給系およびエンジンまわりの計測点を図 5 に示し、END-TO-END の較正データを表 2 に示す（但し流量に関しては単体較正）。

同表のデータのうち燃焼室圧力、インタフェイス圧力、推進薬噴射圧力以外の各項目については、それぞれのシリーズをとおして有効な値である。しかし、上記の 3 項目については、検出器の故障あるいはその特性上の不具合から、シリーズの途中で検出器の交換がなされており、したがってキーンバや精度もその都度変更されているので、ここではその代表例を示すに留めた。表中の総合精度にはリニアリティやヒステリシスによる誤差は含まれていない。リニアリティやヒステリシスについてはキーンバ較正の以前にチェックされ、所定の基準を越える場合には検出器の交換または計測システムの調整を行なうことになっており、ここに示されている程度のリニアリティやヒステリシスは、定常値の計測に関しては殆んど無視し得るほどのものと考えられる。

流量計の較正データのうち、昭和 48 年度の試験におけるキーンバは、流量計の購入当時に行われたメカ（トキコ・株）の水較正データによるものであり、昭和 49 年度

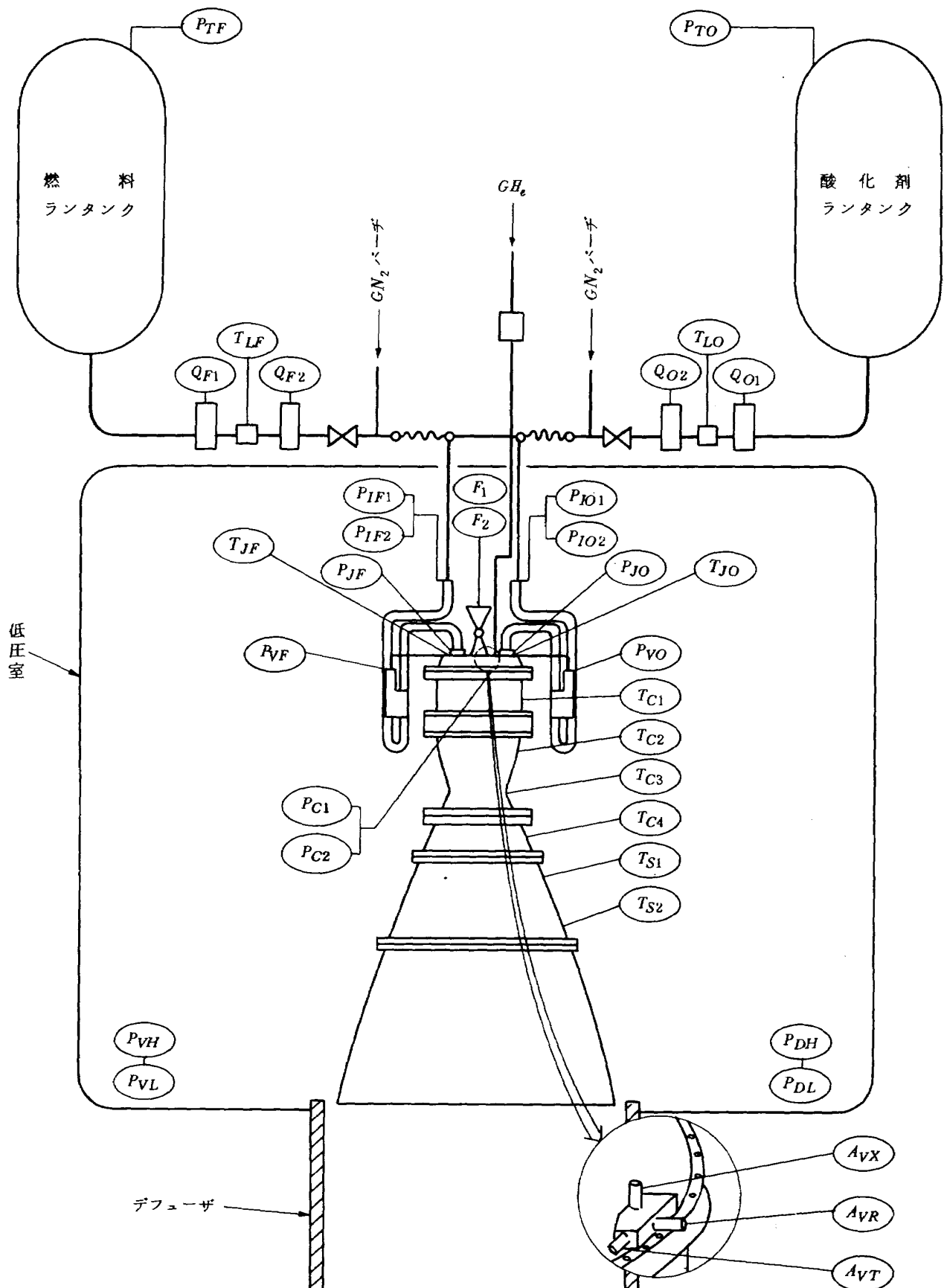


図5 検出器取付け位置

表 2 検出器類の校正データ

	昭和 48 年度試験				昭和 49 年度第 1 次試験				昭和 49 年度第 2 次試験			
	キーナンバ	総合精度	リニアリティ	ヒステリシス	キーナンバ	総合精度	リニアリティ	ヒステリシス	キーナンバ	総合精度	リニアリティ	ヒステリシス
推 力	$F_1$	5.006	0.21	0.02	0.00	5.000	0.20	0.04	0.05	5.001	0.12	0.05
推 力	$F_2$	5.008	0.21	0.01	0.00	5.005	0.30	0.06	0.05	5.005	0.11	0.05
燃 焼 室 圧 力	$P_{C1}$	14.86	0.24	0.31	0.04	22.53	0.22	0.08	0.19	22.37	0.23	0.12
燃 焼 室 圧 力	$P_{C2}$	14.88	0.27	0.28	0.07	22.39	0.26	0.08	0.09	22.44	0.23	0.05
O 噴 射 圧 力	$P_{JO}$	22.28	0.22	0.17	0.03	74.85	0.24	0.03	0.06	75.30	0.21	0.00
F 噴 射 圧 力	$P_{JF}$	22.29	0.26	0.20	0.08	74.88	0.20	0.04	0.09	75.30	0.21	0.03
O インタフェース圧力	$P_{IO1}$	22.60	0.31	0.23	0.05	22.37	0.20	0.11	0.17	38.05	0.21	0.02
O インタフェース圧力	$P_{IO2}$	—	—	—	—	22.39	0.22	0.11	0.19	37.37	0.23	0.04
F インタフェース圧力	$P_{IF1}$	22.50	0.21	0.21	0.04	22.45	0.22	0.06	0.11	37.79	0.21	0.06
F インタフェース圧力	$P_{IF2}$	—	—	—	—	22.35	0.26	0.05	0.17	37.59	0.21	0.02
O ランタンク圧力	$P_{TO}$	37.71	0.21	0.10	0.01	37.67	0.22	0.06	0.08	37.70	0.21	0.03
F ランタンク圧力	$P_{TF}$	37.53	0.22	0.11	0.01	37.56	0.21	0.06	0.09	37.57	0.21	0.04
低 圧 室 圧 力	$P_a$	55.2	0.98	0.35	0.03	55.2	0.43	0.27	0.27	55.28	0.46	0.30
O 流 量	$Q_{O1}$	2.613	0.27			2.619	0.41			2.619	0.41	
O 流 量	$Q_{O2}$	2.605	0.13			2.617	0.44			2.617	0.44	
F 流 量	$Q_{F1}$	2.650	0.30			2.642	0.41			2.642	0.41	
F 流 量	$Q_{F2}$	2.657	0.30			2.653	0.27			2.653	0.27	
O ライン温度	$T_{LO}$	30.8	0.5			28.8	0.5			31.7	0.5	
F ライン温度	$T_{LF}$	30.8	0.5			28.8	0.5			31.7	0.5	
再生冷却温度	$T_R$	—	—			28.8	0.5			31.7	0.5	
O 噴 射 温度	$T_{JO}$	101	0.5			28.8	0.5			31.7	0.5	
F 噴 射 温度	$T_{JF}$	101	0.5			28.8	0.5			31.7	0.5	

(注) 表に示したデータの単位

1. キーナンバ: 推力……t,  $P_a$  以外の圧力……kg/cm<sup>2</sup>,  $P_a$  ……torr, 流量……l/s, 温度……℃
2. 総合精度, リニアリティ, ヒステリシスはそれぞれのキーナンバ値に対する%

の試験におけるキーマンバは、三菱重工業㈱・堂崎実験場における燃焼試験に便乗して求めた実液校正データによるものである（同社の設備では推進薬ランタンクが基準タンクを兼ねる構造になっており、燃焼試験に便乗すれば実液校正が容易である）。これらの単体校正による場合の総合精度  $P_r$  は次式によった。

$$P_r = \pm (P_{r1}^2 + P_{r2}^2)^{1/2}$$

ここで、 $P_{r1}$  : 検出器の単体校正で求めたキーマンバの精度

$P_{r2}$  : 当所の計測システムの精度で、次のとおりであった。

$$P_{r2}(Q_{O1}) = \pm 0.14 \%$$

$$P_{r2}(Q_{O2}) = \pm 0.08 \%$$

$$P_{r2}(Q_{F1}) = \pm 0.17 \%$$

$$P_{r2}(Q_{F2}) = \pm 0.09 \%$$

#### 4. 試験の内容および経過

昭和 48 年度の試験は LE-3 型エンジンの過渡特性を明らかにすることを主目的として行なわれた。しかし、この試験で用いられたロケット・エンジン高空性能試験設備は竣工して間もないものであり、また、LE-3 型エンジンについての初めての試験でもあったので、この試験設備の機能や計測精度が、人工衛星の打ち上げに必要とされる高度の要求条件を満足するかどうかを確認することを兼ねるものであった。

昭和 49 年度の試験は 2 期に分けて実施され、第 1 次の試験では N ロケット 1 号および 2 号機に搭載するエンジン（#21, #22 号エンジン）およびその予備エンジン（#23）の計 3 台について、飛しょう用エンジンとしての機体側から要求される条件（O/F 混合比、インタフェース圧力）のもとで試験が行なわれたが、これは NASDA が実施する領収試験の一部をなすものであった。第 2 次の試験は認定試験のために用意されたこれと同型のエンジン 5 台（#24～#28）について、同様の領収試験を兼ねた標準作動条件（5.1 節参照）の試験を行なったのち、そのうちの 1 台のエンジン（#24）については作動時間を 120 秒とする試験（作動寿命試験）を行ない、他の 2 台のエンジン（#25, #26）については環境試験の 1 部である振動試験（NASDA・筑波宇宙センタで実施）を行なったのち再び標準作動条件の試験を行なった。

全シリーズの試験条件は表 3-(a), (b) にまとめられている。同表の KT-001～008 は、前記ノズルスカート座屈の危険のほか、本試験の前に行なわれた同型エンジンについての米国（ノースアメリカン・ロックウェル

社）における座屈事例（3 回）も考慮して、スカート出口端のフランジに補強リングを用いて行なわれた。KT-009 以後の試験においては補強リングを外したが、座屈は起らず、当所設備の安全性が確認された。KT-001, -002 は試験設備の機能および操作手順の確認などを目的とする予備試験として実施されたものである。KT-001 の試験では低圧室の鏡板を外し、エンジン・ノズルの開口比を 3（スペーサの手前まで）として 5 秒間の大気圧燃焼を行ない、KT-002 の試験では 5 秒間の高空燃焼を行なった。KT-011～-036 は推進薬の温度条件を  $15 \pm 10^\circ\text{C}$  とし、推進薬の温度がこの範囲にあるときは温度調節をしなかったため、気候の変化に伴い  $5 \sim 20^\circ\text{C}$  の間で試験が行なわれた。推進薬の温度を  $32^\circ\text{C}$  とする KT-037～-039 の試験は、ロケットの発射に際して、炎天下に機体がさらされる間の温度上昇を考慮して追加されたものである。

エンジンと機体との適合上重要なインタフェース圧力および O/F 混合比は、計画された作動条件に正しく合せることができないものもあった。これは設備側・動作タンク加圧用調圧弁の不調に由来するものであるが、実験式を用いる補正により、エンジン性能の評価には支障がない。

作動寿命試験を行なった #24 号エンジンは、通算して 510 秒の燃焼を経たが、アブレーティブ・ライナはエロジョンの発生もなく原型を保っていた。#25 号、#26 号エンジンの振動試験後の燃焼試験に先立って実施したエンジンの点検で、#25 号エンジンの燃料側のメインバルブに軽微の気密洩れがみられたが問題となる量ではなかった（スペックの許容量 200 cc/h に対して、40 cc/h）。供試エンジンの作動は、図 6 でみられるように、原型エンジン、完成エンジンを問わず、円滑かつ安定したものであった。

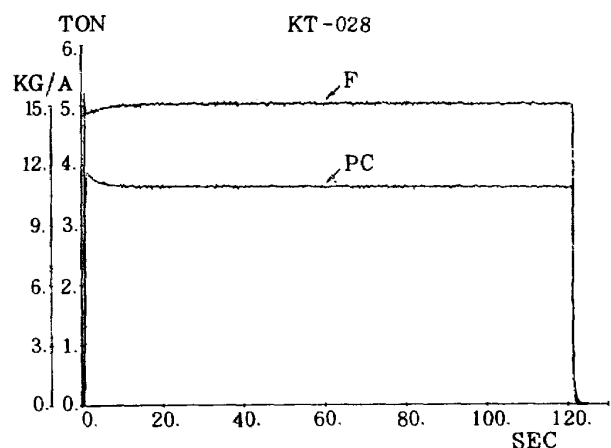


図 6 推力および燃焼圧力



表 3-(a) 試験目標値 (昭和 48 年度試験)

試験番号	エンジン番号	$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	$\dot{W}_O$ kg/s	$\dot{W}_F$ kg/s	$O/F$	$T_P$ ℃	$t_b$ s	$t$ * ms
KT-001	#18	11.0	10.63	7.08	1.5	10	5	600 ~ 700
002	18	11.0	10.63	7.08	↑	↑	5	600 ~ 700
003	12	11.0	10.63	7.08	↓	↓	15	600
004	↑	11.6	11.14	7.43	↓	10	↑	500 ~ 600
005	↑	11.6	11.14	7.43	1.5	15	↑	600
006	↑	12.3	12.06	7.53	1.6	15	↑	600
007	↑	11.6	11.06	7.38	1.5	15	↑	500
008	↑	11.6	11.06	7.38	1.5	5	↑	450
009	↓	11.6	11.06	7.38	1.5	25	↓	450
010	12	10.9	10.13	7.24	1.4	15	15	600

KT-001, -002 は予備試験

\* .....エンジン・バルブが閉じ始めてから全閉となるまでの時間

表 3-(b) 試験目標値 (昭和 49 年度試験)

試験番号	エンジン番号	$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	$P_{IO}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	$P_{IF}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	$O/F$	$T_P$ ℃	$t_b$ s
KT-011	#21	11.63	19.9	20.2	1.512	15 ± 10	15
012	21	↑	↑	↑	1.512	↑	↑
013	22	↑	↓	↑	1.519	↑	↑
014	22	↑	19.9	↑	1.519	↑	↑
015	23	↑	20.0	↑	1.500	↑	↑
016	23	↑	↑	↑	↑	↑	↑
017	24	↑	↑	↑	↑	↑	↑
018	24	↑	↑	↑	↑	↑	↑
019	25	↑	↑	↑	↑	↑	↑
020	25	↑	↑	↑	↑	↑	↑
021	26	↑	↑	↑	↑	↑	↑
022	26	↑	↑	↑	↓	↑	↑
023	27	↑	↑	↑	↓	↑	↑
024	27	↑	↑	↑	1.500	↑	↑
025	28	↑	↑	↑	1.450	↑	↑
026	28	↓	↓	↓	1.450	↑	↓
027	24	11.63	20.0	20.2	1.550	↑	15
028	↑	10.80	17.8	18.5	1.550	↑	120
029	↑	12.30	21.4	22.3	1.500	↑	↑
030	↓	12.30	21.9	21.5	↑	↑	↓
031	24	10.80	18.2	17.9	↑	↑	120
032	25	11.63	20.0	20.2	↑	↑	15
033	25	↑	↑	↑	↑	↑	↑
034	26	↑	↑	↑	↑	↑	↑
035	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑
036	↑	↑	↑	↑	↑	15 ± 10	↑
037	↑	↑	↑	↑	↑	32	↑
038	↓	↓	↓	↓	↓	32	↓
039	26	11.63	20.0	20.2	1.500	32	15

KT-028 ~ -031 は作動寿命試験

KT-032 ~ -039 はエンジンに振動を与えたのちの試験

## 5. 試験結果

## 記号

$A_e$	: ノズル出口端の面積	
$A_t$	: ノズル・スロートの面積	
$C^*$	: 特性排気速度 = $P_t \cdot A_t \cdot g / \dot{W}_T$	(m/s)
$C_F$	: 推力係数 = $F / (P_t \cdot A_t)$	
$C_{FV}$	: 真空推力係数 = $F_V / (P_t \cdot A_t)$	
$F$	: 推力	(kg)
$F_V$	: 真空推力 = $F + A_e \cdot P_a$	(kg)
$I_R$	: 残留力積	(kg·s)
$I_{SP}$	: 比推力 = $F / \dot{W}_T$	(s)
$I_{SP-V}$	: 真空比推力 = $F_V / \dot{W}_T$	(s)
$MR$	: 推進薬混合比 = $\dot{W}_O / \dot{W}_F$	
$P_a$	: 環境圧力 (低圧室圧力) (torr, kg/cm <sup>2</sup> abs)	
$P_c$	: 燃焼室圧力 (噴射器端) (kg/cm <sup>2</sup> abs)	
$P_t$	: インタフェース圧力 ( " )	
$P_N$	: ノズル・スロートにおける全圧 = $0.9707 P_c$	(kg/cm <sup>2</sup> abs)
$Q$	: 推進薬体積流量	(l/s)
$T$	: 温度	(℃)
$t$	: 時間	(s, ms)
$\dot{W}$	: 推進薬重量流量	(kg/s)
$\eta_{C^*}$	: $C^*$ 効率 = $(C^* / C_{TH}^*) \times 100$	(%)
$\eta_{C_{FV}}$	: $C_{F-V}$ 効率 = $(C_{F-V} / C_{F-V-TH}) \times 100$	(%)
$\eta_{I_{SPV}}$	: $I_{SP-V}$ 効率 = $(I_{SP-V} / I_{SPV-TH}) \times 100$	(%)
$\epsilon$	: ノズル開口面積比	

## 添字

$F$	: 燃料
$O$	: 酸化剤
$T$	: 燃料 + 酸化剤
$TH$	: 理論性能

## 5.1 エンジンの定常性能

本試験で得られたデータおよびその解析結果を表 4 に示す。これらの結果はエンジン点火ののち 14 秒を経過した時点を開始とした 10 ms 間隔データ 19 ケ (KT-016 まで) あるいは 100 ケ (KT-017 以後) の平均値をもとにしたものである (スライスタイム 14 秒)。

性能欄の SITE PERFORMANCE は実測値およびこれにもとづく性能計算の結果である。RATED PERFORMANCE は上の実測データをもとにして、作動条件を、 $F_V = 5440$  kg

$$MR = 1.500 \pm 0.02$$

$$P_{IO} = 20.00 \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$$

$$P_{IF} = 20.20 \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$$

$$T_O = T_F = 15^\circ\text{C}$$

とするときに予想される性能を求めたものである。

ただし、 $MR$ ,  $P_t$  のそれぞれ  $\pm 0.02$ ,  $\pm 0.5$  は、飛しょう用エンジンの場合に、この範囲内で機体側から値が与えられることを示し、N 1 号機および N 2 号機に搭載された #21, #22 号エンジンの  $MR$ ,  $P_{IO}$ ,  $P_{IF}$  はそれぞれ下表に示す通りである。また、飛しょう用以外のエンジンではそれらをゼロとし標準作動条件と称する。

	$MR$	$P_{IO}$	$P_{IF}$
	—	kg/cm <sup>2</sup> abs	kg/cm <sup>2</sup> abs
#21 号エンジン	1.512	19.90	20.20
#22 号エンジン	1.519	19.90	20.20

ENGINE PATED PERFORMANCE は、実機用エンジンについて求めた上記の RATED PERFORMANCE では作動条件がエンジン号機毎に異なるためエンジン相互の直接的な比較が困難なので、これを容易にするために、標準作動条件とした場合に予想される性能を求めたものである。従って、#21 号と #22 号エンジン以外では RATED と ENGINE RATED の性能は同じである。

SITE PERFORMANCE 欄のエンジン性能を真空性能に換算し、これらの値を試験条件ごとにまとめると図 7~15 のとおりである。

図 7, 8 によればエンジンの公称推力 5440 kg に必要な燃焼圧力および推進薬供給量を知るが、原型エンジンと完成エンジンとの差も明らかである。図 9~14 にはエンジン性能を評価するパラメータ  $C^*$ ,  $C_F$ ,  $I_{SP}$  に対する  $MR$  および  $P_c$  の効果を示したが、これらの効果はかなり小さいようである。また、図 15 には推進薬の温度効果が示されており、 $C^*$ ,  $I_{SP}$  が温度の上昇とともに低下する傾向がみられる。しかし、ロケットの発射条件を考慮して計画された推進薬温度 32℃ の試験で得た  $I_{SP}$  の値は供試エンジンの公称値 ( $I_{SP} > 285$  s) に対して十分の余裕がみられる。

次に、RATED PERFORMANCE または ENGINE RATED PERFORMANCE (#21, #22 号エンジン) に着目すれば、エンジン相互の比較や同一エンジンで試験を繰り返す際のデータのバラツキ (実験誤差) を知ることが可能である。すなわち、供試エンジン 9 台の試験で得たエンジン性能を、それぞれの平均値について比較すると表 5 のとおりであり、#24~#26 号エンジンについて行なった作動寿命試験およびエンジンに振動を与えたのちの燃焼試験で得たエンジン性能は表 6 のように、その前に実施したものと比較して  $I_{SP}$  が高めのようである。

表 4 - (a) LE-3 エンジンの高空性能試験成績 (SLICE TIME : 14 s)

試験番号	KT-003		KT-004		KT-005		KT-006		KT-007		KT-008		KT-009		KT-010	
エンジン番号	# 12		# 12		# 12		# 12		# 12		# 12		# 12		# 12	
年月日	48. 9. 26		48. 9. 28		48. 10. 3		48. 10. 5		48. 10. 9		48. 10. 12		48. 10. 19		48. 10. 18	
PERFORMANCE	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED
$P_a$ torr	10.6	0	11.7	0	12.0	0	12.5	0	12.4	0	12.1	0	12.6	0	12.1	0
$F$ kg	4973	5440	5303	5440	5397	5440	5607	5440	5388	5440	5298	5440	5343	5440	5020	5440
$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	10.92	11.69	11.62	11.68	11.81	11.66	12.24	11.65	11.78	11.64	11.61	11.67	11.67	11.63	11.01	11.64
$P_N$ kg/cm <sup>2</sup> abs	10.60	11.35	11.28	11.34	11.46	11.32	11.88	11.31	11.43	11.30	11.27	11.32	11.33	11.29	10.69	11.30
$MR$	1.522	1.500	1.565	1.500	1.510	1.500	1.606	1.500	1.514	1.500	1.519	1.500	1.503	1.500	1.402	1.500
$\dot{W}_O$ kg/s	10.43	11.12	11.26	11.12	11.26	11.09	12.03	11.12	11.30	11.12	11.10	11.11	11.19	11.12	10.19	11.11
$\dot{W}_F$ kg/s	6.85	7.41	7.19	7.41	7.46	7.39	7.49	7.41	7.46	7.41	7.31	7.41	7.45	7.41	7.27	7.40
$T_O$ °C	10.5	15.0	10.8	15.0	15.2	15.0	15.4	15.0	14.7	15.0	8.3	15.0	23.9	15.0	14.9	15.0
$T_F$ °C	10.3	15.0	10.4	15.0	15.9	15.0	15.5	15.0	14.3	15.0	6.4	15.0	24.1	15.0	15.8	15.0
$\rho_O$ kg/l	1.465	1.460	1.464	1.460	1.455	1.460	1.455	1.460	1.456	1.460	1.470	1.460	1.436	1.460	1.456	1.460
$\rho_F$ kg/l	0.911	0.910	0.911	0.910	0.906	0.910	0.907	0.910	0.908	0.910	0.915	0.910	0.898	0.910	0.907	0.910
$C^*$ m/s	1613	1612	1608	1609	1610	1611	1601	1606	1603	1603	1611	1609	1599	1603	1610	1607
$\eta_{C^*}$ %	92.19	92.11	91.87	91.94	92.02	92.07	91.46	91.75	91.58	91.62	92.05	91.92	91.36	91.60	92.26	91.81
$C_F$	1.748	1.785	1.752	1.788	1.754	1.791	1.758	1.792	1.756	1.794	1.751	1.790	1.757	1.795	1.750	1.793
$\eta_{CF}$ %	97.47	97.82	97.49	97.96	98.04	98.11	97.63	98.19	98.20	98.30	97.83	98.06	98.37	98.35	98.60	98.24
$I_{SP}$ s	287.6	293.6	287.4	293.5	288.3	294.4	287.3	293.6	287.2	293.5	287.8	293.7	286.7	293.6	287.5	293.9
$\eta_{ISP}$ %	89.86	90.10	89.57	90.06	90.21	90.33	89.30	90.09	89.93	90.06	90.05	90.13	89.87	90.09	90.97	90.19
$P_{IO}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	17.58	20.00	19.17	20.00	19.47	20.00	21.05	20.00	19.10	20.00	18.97	20.00	19.39	20.00	17.33	20.00
$P_{IF}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	17.55	20.20	18.88	20.20	19.63	20.20	20.11	20.20	19.53	20.20	18.96	20.20	19.40	20.20	18.42	20.20

表4-(b) LE-3エンジンの高空性能試験成績 (SLICE TIME: 14s)

試験番号	KT-011			KT-012			KT-013			KT-014			KT-015			KT-016		
	# 21			# 21			# 22			# 22			# 23			# 23		
年 月 日	49. 6. 17			49. 6. 19			49. 6. 20			49. 6. 24			49. 6. 26			49. 6. 28		
PERFORMANCE	SITE	RATED	ENGINE RATED	SITE	RATED	ENGINE RATED	SITE	RATED	ENGINE RATED	SITE	RATED	ENGINE RATED	SITE	RATED	ENGINE RATED	SITE	RATED	ENGINE RATED
$P_a$ torr	10.9	0	0	11.0	0	0	11.6	0	0	11.2	0	0	11.2	0	0	11.2	0	0
$F$ kg	5196	5440	5440	5256	5440	5440	5451	5440	5440	5463	5440	5440	5410	5440	5440	5337	5440	5440
$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.35	11.65	11.65	11.48	11.64	11.64	11.85	11.60	11.61	11.88	11.62	11.62	11.75	11.60	11.62	11.62	11.61	11.61
$P_N$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.02	11.31	11.31	11.14	11.30	11.30	11.50	11.26	11.27	11.53	11.28	11.28	11.41	11.26	11.41	11.28	11.27	11.27
$MR$	1.470	1.512	1.500	1.430	1.512	1.500	1.566	1.519	1.500	1.514	1.519	1.500	1.522	1.500	1.522	1.506	1.500	1.500
$\dot{W}_O$ kg/s	10.89	11.30	11.26	10.84	11.24	11.21	11.66	11.25	11.19	11.49	11.23	11.17	11.47	11.23	11.47	11.26	11.22	11.22
$\dot{W}_F$ kg/s	7.41	7.47	7.51	7.58	7.44	7.47	7.44	7.41	7.46	7.59	7.39	7.45	7.54	7.49	7.54	7.48	7.48	7.48
$T_O$ °C	18.4	15.0	15.0	21.4	15.0	15.0	20.3	15.0	15.0	20.8	15.0	15.0	19.6	15.0	19.6	18.9	15.0	15.0
$T_F$ °C	19.2	15.0	15.0	21.9	15.0	15.0	20.8	15.0	15.0	20.6	15.0	15.0	19.2	15.0	19.2	19.1	15.0	15.0
$\rho_O$ kg/l	1.446	1.460	1.460	1.439	1.460	1.460	1.441	1.460	1.460	1.440	1.460	1.460	1.443	1.460	1.443	1.444	1.460	1.460
$\rho_F$ kg/l	0.909	0.910	0.910	0.907	0.910	0.910	0.908	0.910	0.910	0.908	0.910	0.910	0.909	0.910	0.909	0.909	0.910	0.910
$C^*$ m/s	1584	1584	1585	1592	1592	1592	1584	1588	1589	1590	1593	1594	1579	1582	1579	1583	1585	1585
$\eta_{C^*}$ %	90.59	90.52	90.56	91.11	90.94	90.98	90.46	90.73	90.79	90.86	91.01	91.07	90.23	90.41	90.23	90.47	90.59	90.59
$C_F$	1.757	1.793	1.792	1.757	1.793	1.793	1.766	1.799	1.799	1.764	1.797	1.797	1.767	1.800	1.767	1.763	1.798	1.798
$\eta_{C_F}$ %	98.30	98.14	98.20	98.60	98.18	98.25	98.25	98.46	98.56	98.44	98.34	98.45	98.53	98.60	98.53	98.47	98.49	98.49
$I_{SP}$ s	284.0	289.7	289.8	285.5	291.2	291.3	285.4	291.6	291.6	286.3	292.1	292.2	284.7	290.6	284.7	284.9	290.8	290.8
$\eta_{I_{SP}}$ %	89.05	88.83	88.93	89.83	89.29	89.39	88.88	89.33	89.49	89.45	89.50	89.65	88.90	89.15	88.90	89.09	89.22	89.22
$P_{TO}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	19.13	19.90	20.00	19.15	19.90	20.00	20.44	19.90	20.00	20.20	19.90	20.00	21.27	20.00	21.27	19.85	20.00	20.00
$P_{IF}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	19.77	20.20	20.20	20.23	20.20	20.20	20.10	20.20	20.20	20.51	20.20	20.20	20.28	20.20	20.28	19.99	20.20	20.20

表 4-(c) LE-3 エンジンの高空性能試験成績 (SLICE TIME : 14 s)

試験番号	KT-017	KT-018		KT-019		KT-020		KT-021		KT-022		KT-023		KT-024	
エンジン番号	# 24	# 24		# 25		# 25		# 26		# 26		# 27		# 27	
年月日	49. 10. 8	49. 10. 9		49. 10. 15		49. 10. 16		49. 10. 18		49. 10. 22		49. 10. 24		49. 10. 25	
PERFORMANCE	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE
$P_a$ torr	10.1	0	10.4	0	10.4	0	10.4	0	10.4	0	11.0	0	10.4	0	10.6
$F$ kg	5269	5440	5366	5440	5386	5440	5438	5440	5474	5440	5536	5440	5389	5440	5391
$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.47	11.62	11.68	11.63	11.73	11.63	11.82	11.62	11.92	11.64	12.02	11.60	11.70	11.60	11.74
$P_N$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.14	11.28	11.34	11.29	11.39	11.29	11.47	11.28	11.57	11.30	11.66	11.26	11.35	11.26	11.39
$MR$	1.404	1.500	1.457	1.500	1.488	1.500	1.525	1.500	1.601	1.500	1.601	1.500	1.517	1.500	1.487
$\dot{W}_O$ kg/s	10.78	11.25	11.19	11.27	11.32	11.27	11.60	11.28	11.62	11.27	11.98	11.26	11.40	11.25	11.31
$\dot{W}_F$ kg/s	7.68	7.50	7.68	7.51	7.61	7.52	7.53	7.52	7.62	7.51	7.49	7.51	7.51	7.50	7.61
$T_O$ °C	15.5	15.0	16.3	15.0	13.6	15.0	13.5	15.0	12.6	15.0	12.7	15.0	14.3	15.0	15.9
$T_F$ °C	14.9	15.0	15.9	15.0	13.2	15.0	13.2	15.0	12.9	15.0	12.8	15.0	13.6	15.0	14.3
$\rho_O$ kg/l	1.485	1.460	1.457	1.460	1.463	1.460	1.463	1.460	1.465	1.460	1.465	1.460	1.458	1.460	1.455
$\rho_F$ kg/l	0.914	0.910	0.913	0.910	0.915	0.910	0.915	0.910	0.916	0.910	0.916	0.910	0.915	0.910	0.914
$C^*$ m/s	1588	1584	1583	1582	1588	1586	1583	1584	1587	1587	1580	1583	1585	1585	1590
$\eta_C^*$ %	90.97	90.55	90.55	90.42	90.73	90.66	90.45	90.54	90.64	90.68	90.28	90.48	90.57	90.60	90.86
$C_F$	1.761	1.795	1.761	1.794	1.756	1.789	1.760	1.790	1.758	1.789	1.763	1.794	1.762	1.793	1.756
$\eta_{CF}$ %	98.79	98.34	98.50	98.27	98.02	98.00	97.87	98.09	97.86	98.01	97.74	98.30	98.15	98.26	98.08
$I_{SP}$ s	285.4	290.2	284.5	289.6	284.5	289.5	284.3	289.4	284.6	289.6	284.3	289.9	284.9	290.1	284.9
$\eta_{ISP}$ %	89.87	89.04	89.19	88.85	88.94	88.84	88.52	88.81	88.70	88.88	88.23	88.94	88.89	89.02	89.12
$P_{IO}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	18.91	20.00	19.70	20.00	19.70	20.00	20.14	20.00	20.47	20.00	21.09	20.00	20.29	20.00	20.18
$P_{IF}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	20.09	20.20	20.31	20.20	20.22	20.20	20.12	20.20	20.58	20.20	20.35	20.20	20.22	20.20	20.44

試験番号	KT-025	KT-026	KT-027	KT-028	KT-029	KT-030	KT-031	KT-032								
エンジン番号	# 28	# 28	# 24	# 24	# 24	# 24	# 24	# 25								
年月日	49. 10. 29	49. 10. 30	49. 11. 6	49. 11. 8	49. 11. 13	49. 11. 15	49. 11. 20	49. 11. 22								
PERFORMANCE	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED	SITE RATED								
$P_a$ torr	10.4	0	10.5	0	12.2	0	9.5	0	11.7	0	11.5	0	10.5	0	11.6	0
$F$ kg	5364	5440	5377	5440	5413	5440	5021	5440	5644	5440	5619	5440	5014	5440	5478	5440
$P_c$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.67	11.62	11.68	11.59	11.80	11.61	10.93	11.61	12.27	11.59	12.20	11.60	10.95	11.63	11.92	11.61
$P_N$ kg/cm <sup>2</sup> abs	11.33	11.28	11.33	11.25	11.45	11.27	10.61	11.27	11.91	11.25	11.84	11.26	10.63	11.29	11.57	11.27
$MR$	1.493	1.500	1.497	1.500	1.495	1.500	1.451	1.500	1.457	1.500	1.502	1.500	1.553	1.500	1.518	1.500
$\dot{W}_O$ kg/s	11.26	11.24	11.29	11.23	11.42	11.26	10.40	11.23	11.70	11.22	11.85	11.25	10.70	11.22	11.56	11.22
$\dot{W}_F$ kg/s	7.54	7.49	7.54	7.49	7.64	7.50	7.17	7.49	8.03	7.48	7.88	750	6.89	7.48	7.62	7.48
$T_O$ °C	11.2	15.0	10.8	15.0	13.0	15.0	10.0	15.0	5.2	15.0	17.2	15.0	8.5	15.0	8.6	15.0
$T_F$ °C	11.8	15.0	10.7	15.0	15.1	15.0	9.5	15.0	5.3	15.0	16.9	15.0	8.4	15.0	8.1	15.0
$\rho_O$ kg/l	1.465	1.460	1.466	1.460	1.461	1.460	1.469	1.460	1.479	1.460	1.454	1.460	1.474	1.460	1.471	1.460
$\rho_F$ kg/l	0.917	0.910	0.918	0.910	0.914	0.910	0.918	0.910	0.923	0.910	0.911	0.910	0.919	0.910	0.919	0.910
$C^*$ m/s	1592	1589	1590	1588	1582	1582	1590	1586	1590	1584	1581	1582	1591	1590	1589	1587
$\eta_C^*$ %	90.96	90.83	90.87	90.76	90.42	90.39	90.98	90.63	90.90	90.51	90.31	90.39	90.91	90.86	90.80	90.70
$C_F$	1.757	1.790	1.760	1.793	1.759	1.797	1.761	1.796	1.764	1.799	1.765	1.798	1.756	1.793	1.761	1.797
$\eta_{C_F}$ %	98.06	98.08	98.23	98.26	98.46	98.43	98.46	98.38	98.83	98.59	98.59	98.50	97.69	98.21	98.31	98.44
$I_{SP}$ s	285.3	290.3	285.6	290.7	284.0	290.0	285.7	290.6	286.2	290.8	284.8	290.2	285.0	290.8	285.7	291.0
$\eta_{I_{SP}}$ %	89.19	89.09	89.26	89.18	89.03	88.97	89.58	89.16	89.84	89.24	89.03	89.04	88.81	89.23	89.26	89.28
$P_{IO}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	19.91	20.00	19.95	20.00	20.05	20.00	17.64	20.00	20.80	20.00	20.99	20.00	18.01	20.00	20.28	20.00
$P_{IF}$ kg/cm <sup>2</sup> abs	20.18	20.20	20.17	20.20	20.07	20.20	18.45	20.20	21.64	20.20	21.32	20.20	17.86	20.20	20.41	20.20

表 4 - (e) LE-3 エンジンの高空性能試験成績 (SLICE TIME : 14 s)

試験番号	KT-033		KT-034		KT-035		KT-036		KT-037		KT-038		KT-039
エンジン番号	#25		#26		#26		#26		#26		#26		#26
年月日	49.11.28		49.11.29		49.12.5		49.12.5		49.12.6		49.12.10		49.12.11
PERFORMANCE	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE	RATED	SITE RATED
$P_a$ torr	11.2	0	10.7	0	11.6	0	12.1	0	11.7	0	10.6	0	12.1 0
$F$ kg	5419	5440	5417	5440	5406	5440	5439	5440	5303	5440	4946	5440	5652 5440
$P_c$ kg/cm²abs	11.75	11.56	11.79	11.62	11.78	11.62	11.83	11.60	11.56	11.63	10.79	11.63	12.27 11.61
$P_N$ kg/cm²abs	11.40	11.22	11.44	11.28	11.44	11.28	11.48	11.26	11.22	11.29	10.48	11.29	11.91 11.27
$MR$	1.516	1.500	1.534	1.500	1.478	1.500	1.522	1.500	1.486	1.500	1.481	1.500	1.527 1.500
$W_O$ kg/s	11.42	11.21	11.48	11.23	11.30	11.22	11.52	11.20	11.15	11.21	10.42	11.24	12.03 11.23
$W_F$ kg/s	7.53	7.42	7.48	7.49	7.65	7.48	7.57	7.47	7.50	7.47	7.03	7.49	7.87 7.49
$T_O$ °C	5.7	15.0	5.9	15.0	12.9	15.0	21.9	15.0	30.2	15.0	30.5	15.0	31.1 15.0
$T_F$ °C	5.3	15.0	5.4	15.0	13.4	15.0	24.0	15.0	32.3	15.0	32.4	15.0	33.2 15.0
$\rho_O$ kg/l	1.478	1.460	1.477	1.460	1.462	1.460	1.422	1.460	1.422	1.460	1.423	1.460	1.422 1.460
$\rho_F$ kg/l	0.922	0.910	0.922	0.910	0.914	0.910	0.905	0.910	0.897	0.910	0.897	0.910	0.896 0.910
$C^*$ m/s	1589	1585	1593	1591	1592	1590	1587	1591	1588	1594	1584	1590	1579 1588
$\eta_C^*$ %	90.78	90.60	91.02	90.90	91.00	90.87	90.66	90.95	90.74	91.10	90.57	90.88	90.18 90.73
$C_F$	1.764	1.799	1.758	1.791	1.756	1.792	1.759	1.794	1.756	1.790	1.754	1.790	1.763 1.793
$\eta_{CF}$ %	98.43	98.58	97.85	98.12	98.29	98.19	98.26	98.30	98.27	98.10	98.11	98.07	98.34 98.26
$I_{SP}$ s	286.0	291.1	285.8	290.7	285.2	290.8	284.9	291.4	284.4	291.3	283.4	290.4	284.0 290.6
$\eta_{I_{SP}}$ %	89.35	89.31	89.07	89.19	89.44	89.23	89.08	89.40	89.17	89.37	88.85	89.12	88.68 89.16
$P_{IO}$ kg/cm²abs	19.96	20.00	20.02	20.00	19.92	20.00	20.35	20.00	19.67	20.00	17.86	20.00	21.70 20.00
$P_{IF}$ kg/cm²abs	20.18	20.20	20.08	20.20	20.51	20.20	20.47	20.20	20.07	20.20	18.27	20.20	21.68 20.20

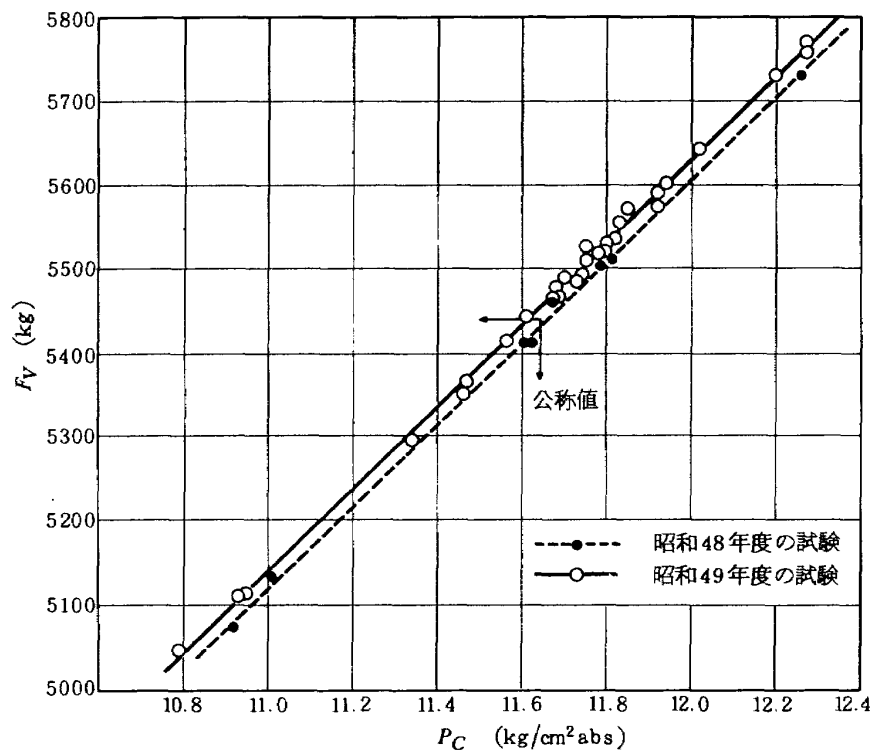


図7 燃焼圧力と真空推力

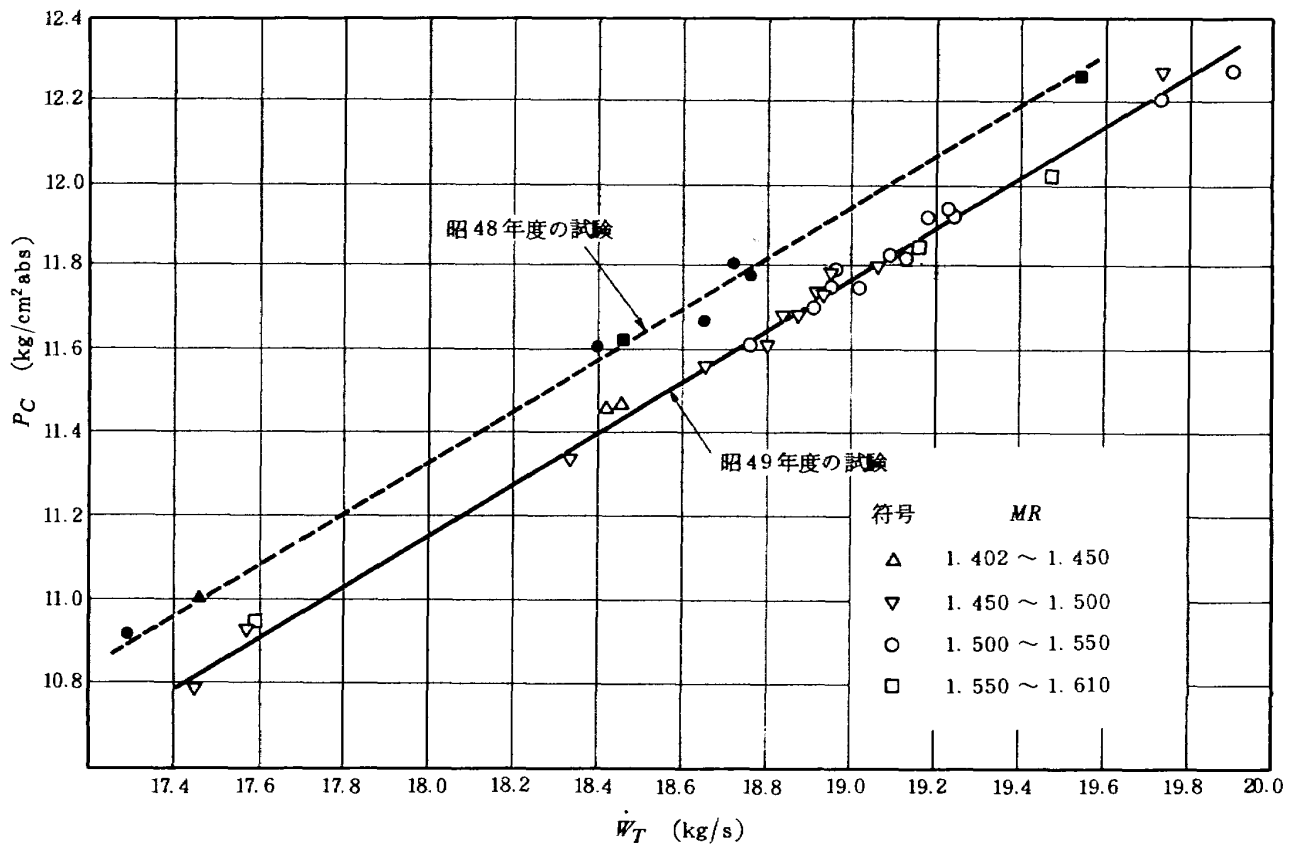


図8 推進薬流量と燃焼圧力



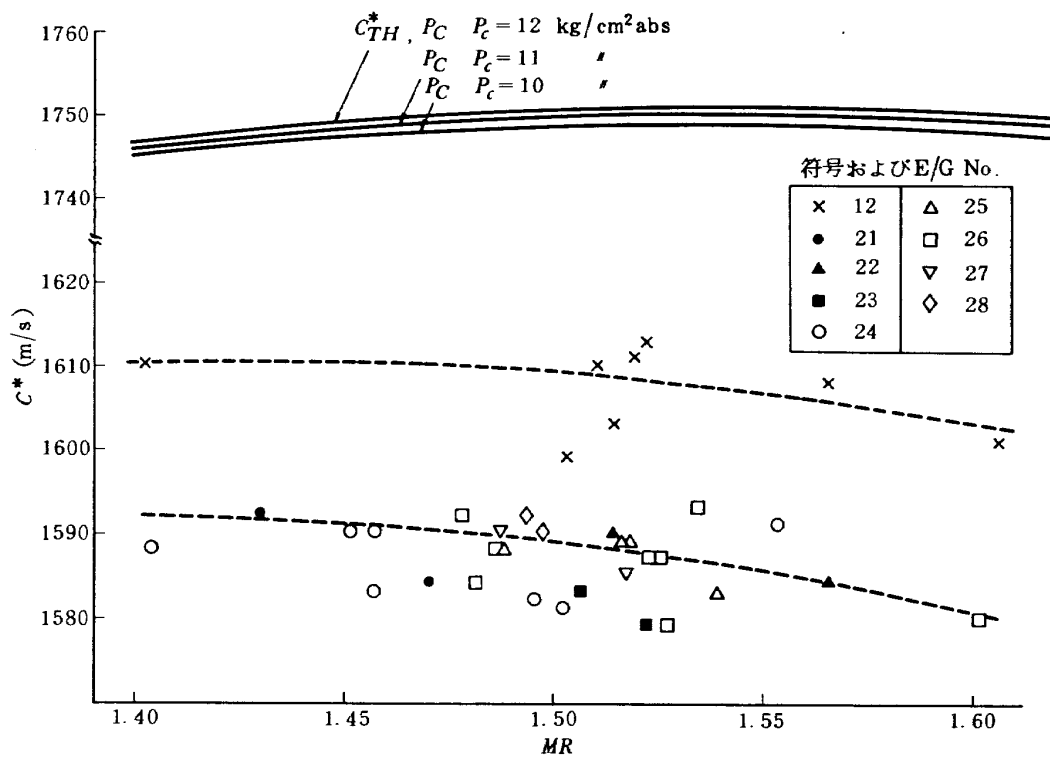


図9 O/F混合比と特性排気速度

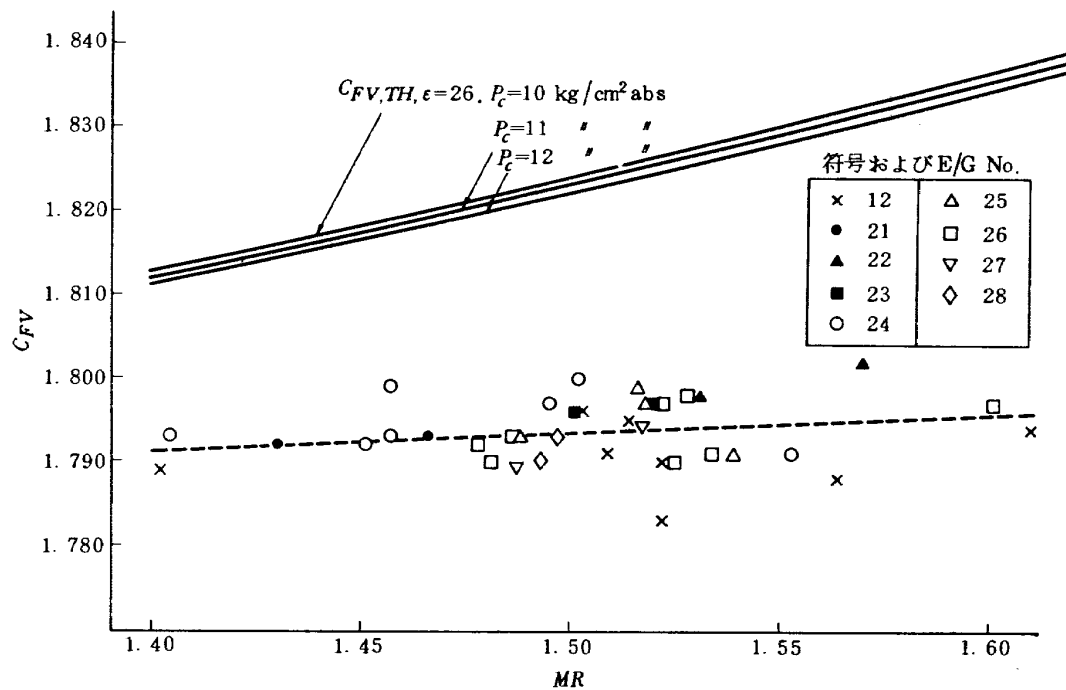


図10 O/F混合比と真空推力係数

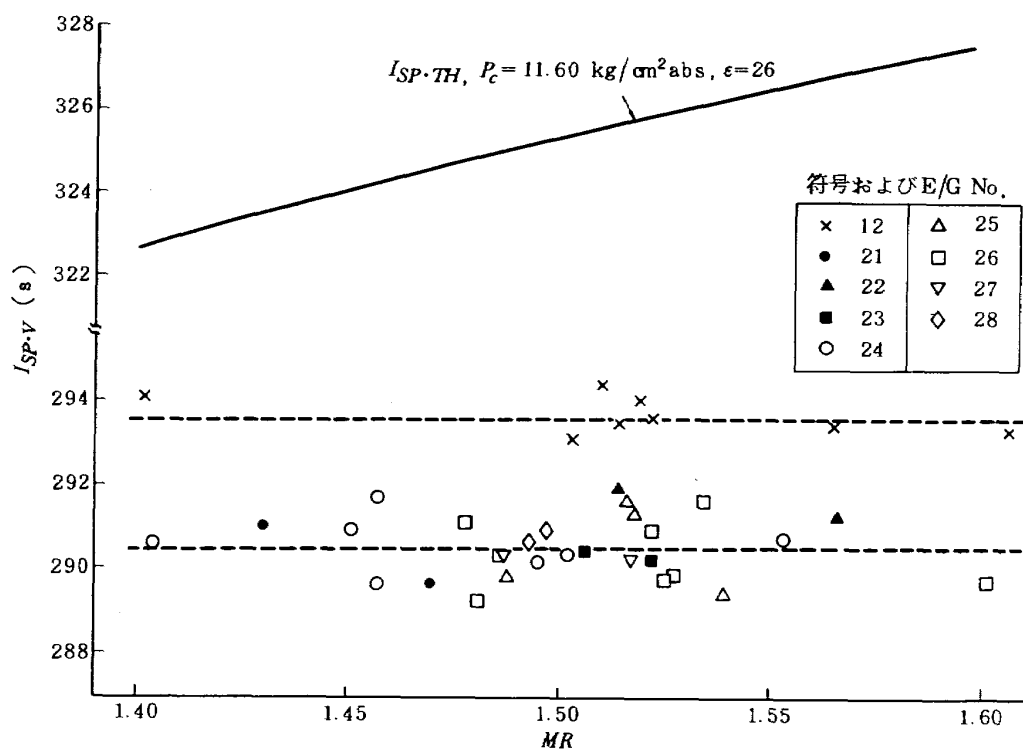


図 11 O/F 混合比と真空比推力

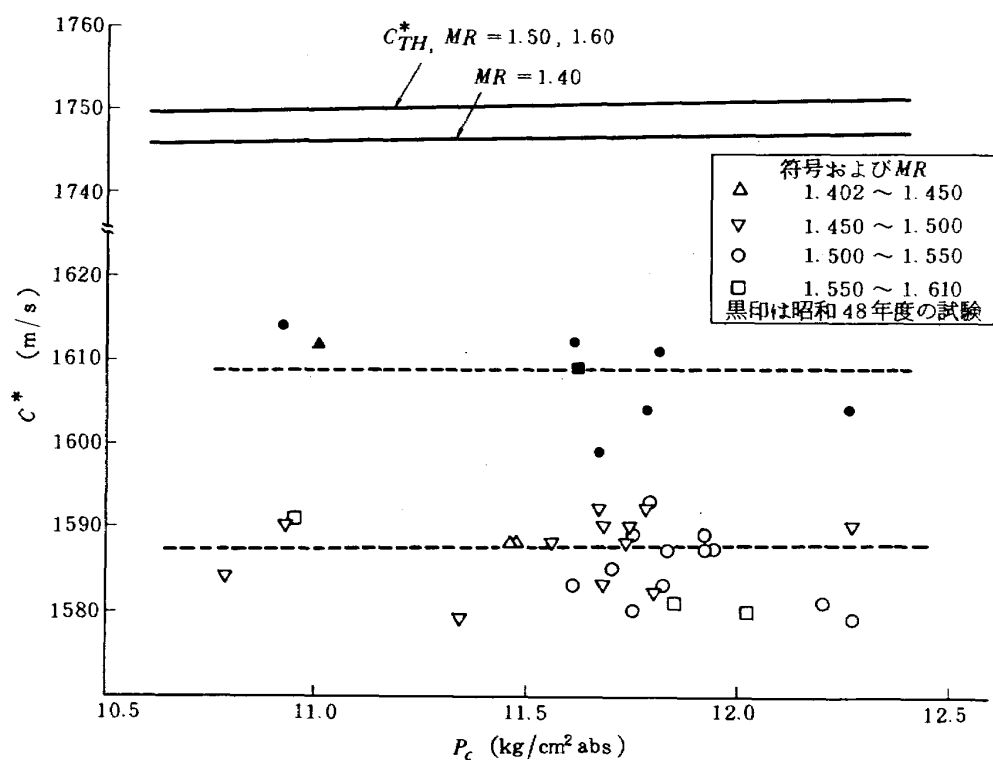


図 12 特性排気速度と燃焼圧力

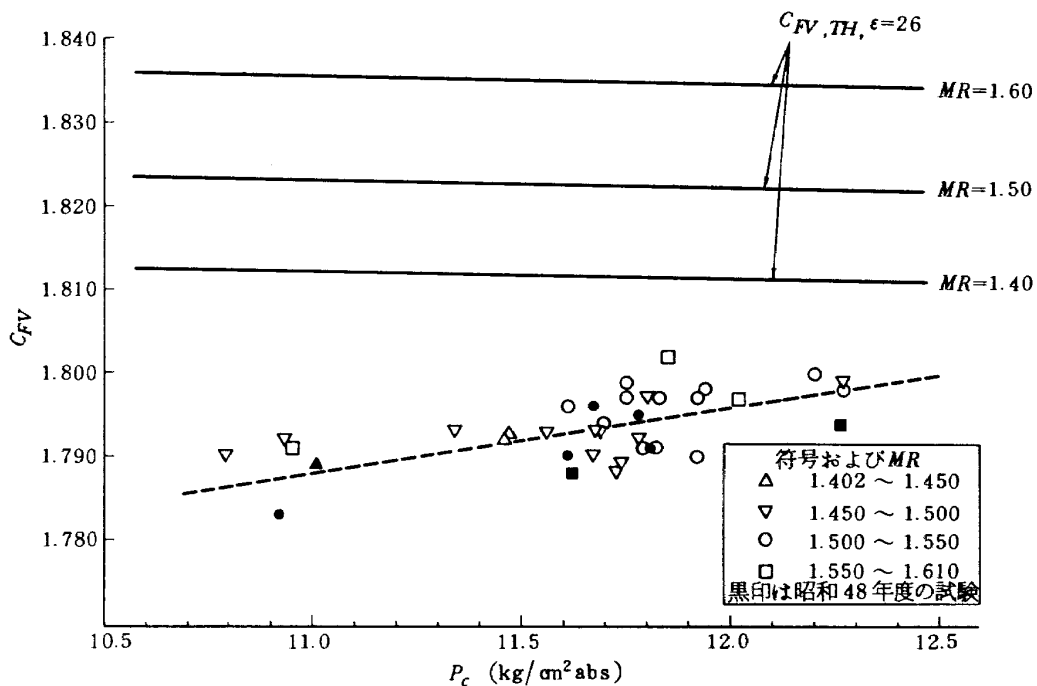


図 13 真空推力係数と燃焼圧力

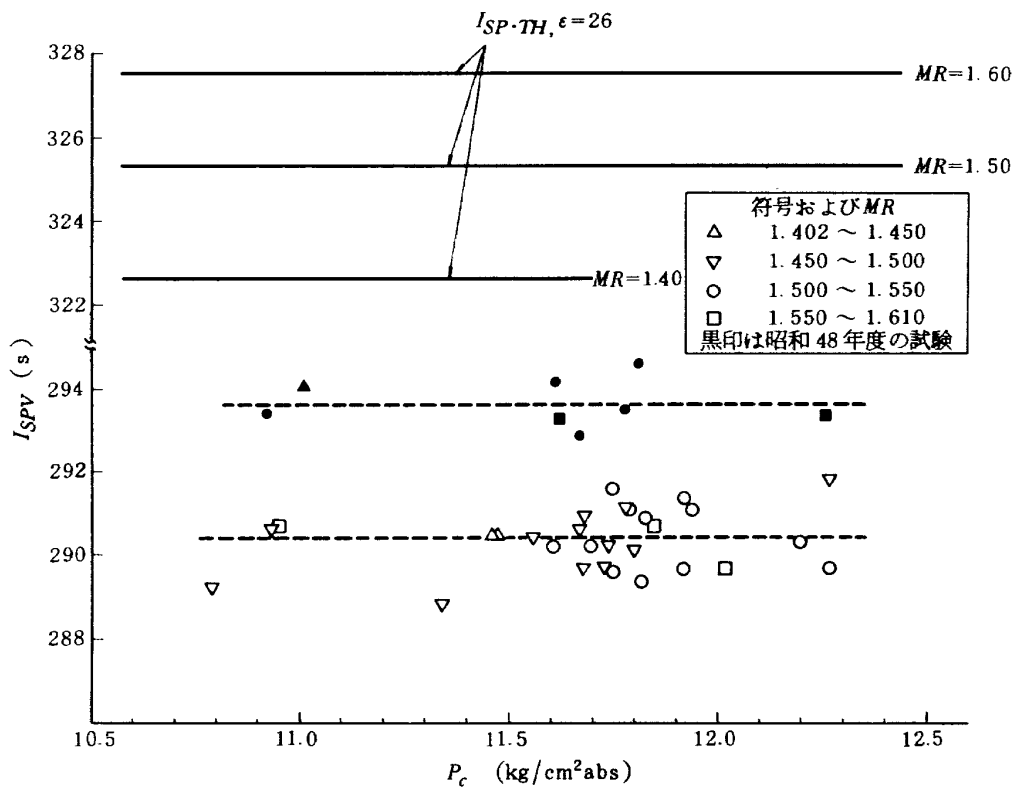


図 14 比推力と燃焼圧力

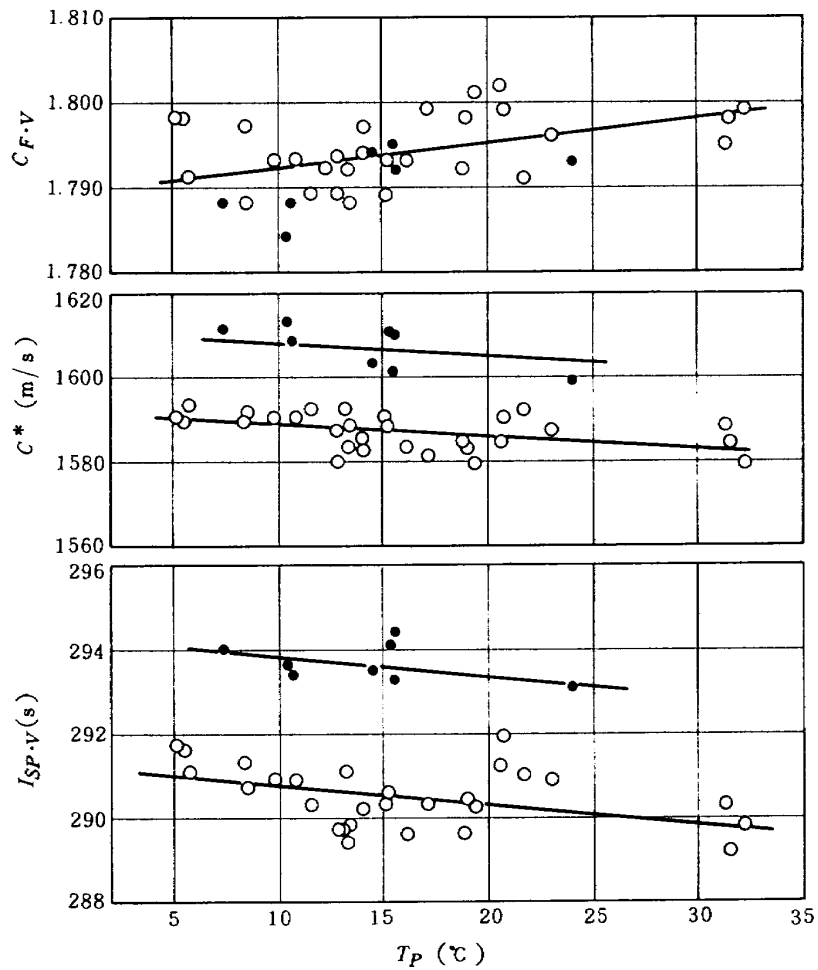


図 15 推進薬温度と比推力，特性排気速度，推力係数  
 ● 昭和48年度の試験      ○ 昭和49年度の試験

表 5 供試エンジン 9 台の性能および実験誤差

		# 12	# 21	# 22	# 23	# 24	# 25	# 26	# 27	# 28
$C^*$ (m/s)	$\bar{x}$	1607.5	1588.5	1591.5	1583.5	1583.0	1585.0	1583.0	1587.0	1588.5
	$\hat{\sigma}_e$	3.4	5.0	3.5	2.1	1.4	1.4	2.8	2.8	0.7
$C_{F-V}$ (—)	$\bar{x}$	1.7910	1.7925	1.798	1.7990	1.7945	1.7985	1.7915	1.7910	1.7915
	$\hat{\sigma}_e$	0.0033	0.0007	0.0014	0.0014	0.0007	0.0007	0.0035	0.0028	0.0021
$I_{SP-V}$ (s)	$\bar{x}$	293.73	290.55	291.90	290.70	289.90	289.45	289.75	290.10	290.50
	$\hat{\sigma}_e$	0.30	1.06	0.42	0.14	0.42	0.07	0.21	0	0.28
試験回数		8	2							

$\bar{x}$  : 平均値

$\hat{\sigma}_e$  : 実験誤差の標準偏差

表 6 作動寿命試験および振動を与えた後の  
燃焼試験における性能および実験誤差

エンジン No		# 24	# 25	# 26
$C^*$ (m/s)	$\bar{x}$	1584.8	1586.0	1590.7
	$\hat{\sigma}_e$	3.3	1.4	2.0
$C_{F \cdot v}$ ( — )	$\bar{x}$	1.7966	1.7980	1.7917
	$\hat{\sigma}_e$	0.0023	0.0014	0.0016
$I_{SP \cdot v}$ ( s )	$\bar{x}$	290.48	291.05	290.87
	$\hat{\sigma}_e$	0.36	0.07	0.40
試験回数		5	2	6

## 5.2 エンジン周辺の温度

エンジンの作動時間を 120 秒とする作動寿命試験におけるエンジン外壁温度を時間軸に対してプロットして図 16 に示すが、その計測位置、符号は図 17 に示されている。これらの計測点のうち、スカートの外壁温度の 2 点については、点溶接した熱電対が外れていたため、これをスカートに押し付けた状態で計測したものである。したがって、この押し付けがゆるみ、あるいは外れて、計測不能のものもあった。ここに示した KT-030 では、カーブそのものは円滑であるが、実際にはここで示されている値よりも高いものと考えられる。スカート以外の温度については 4 回の試験を比較してほとんど同程度であった。

再生冷却後の燃料温度および噴射器内の推進薬 (O, F) 温度の上昇のパターンは図 18 に示すようなものであり、エンジン停止の直前における推進薬温度の上昇は表 8 でみられるように 4 回の試験間の差は僅少である。

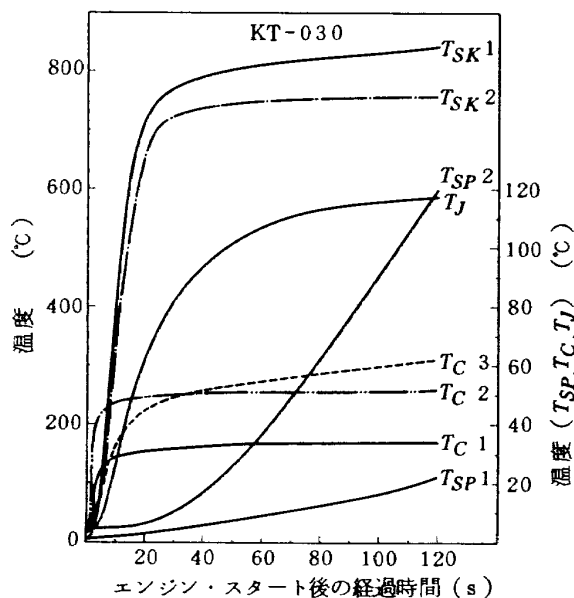


図 16 エンジンの外壁温度

表 7 エンジン停止時の推進薬通路内  
液温および温度上昇

試験番号	KT-028	029	030	031
再生冷却 F 温度 $T_{RC}$	55.1	51.5	63.0	56.9
同上・温度上昇 $T_{RC}-T_F$	45.4	45.5	45.7	47.8
噴射器内 O 温度 $T_{JO}$	44.4	39.1	50.5	43.1
同上・温度上昇 $T_{JO}-T_O$	34.4	33.3	32.9	34.1
噴射器内 F 温度 $T_{JF}$	58.9	55.4	66.4	59.4
同上・温度上昇 $T_{JF}-T_F$	49.2	49.4	49.1	50.4
供給ライン内 O 温度 $T_O$	10.0	5.8	17.6	9.0
供給ライン内 F 温度 $T_F$	9.7	6.0	17.3	9.0

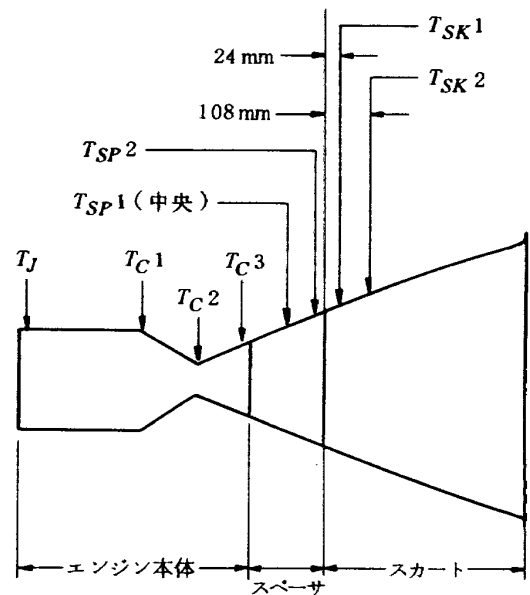


図 17 エンジン外壁温度測定位置および記号

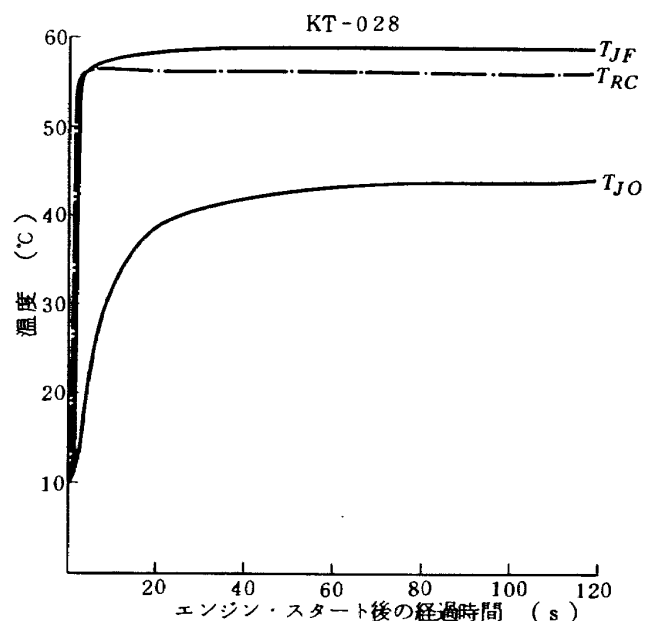


図 18 推進薬通路内の液温

表 8 エンジンの過渡特性

試験番号 KT-	$F_{IG}$ kg	$t_{0.1F}$ ms	$t_{0.9F}$ ms	$t_{P_{c2}}$ ms	$I_R$ kg's
003	4728	640	870	1140	4914
004	5074	750	940	1220	5387
005	5945	710	820	1230	5541
006	6098	750	790	—	—
007	5642	680	780	1200	5239
008	5705	750	790	1230	4831
009	5178	720	800	1120	4862
010	4883	650	860	1250	5421
011	5253	620	840	1200	4946
012	5895	720	820	1200	4929
013	6517	710	810	1190	4945
014	6337	690	780	1180	4933
015	6167	740	840	1150	4866
016	6063	720	820	1150	4887
017	5290	650	880	1180	4986
018	5810	740	870	1210	5063
019	6180	770	900	1210	5220
020	6220	780	880	1210	5207
021	6127	710	880	1170	4943
022	6459	700	780	1170	4951
023	6499	750	820	1170	5052
024	6672	760	890	1180	5092
025	6489	720	860	1130	4969
026	6581	730	800	1180	5002
027	6151	750	780	1200	5299
028	5565	730	830	1290	5219
029	6161	680	890	1300	5619
030	6658	700	780	1310	5665
031	5318	710	880	1230	5065
032	6674	770	820	1290	5232
033	5815	780	820	1220	5221
034	6657	780	850	1160	5307
035	5709	770	840	1200	4984
036	5890	740	920	1210	5018
037	6305	780	830	1240	4924
038	5134	750	840	1150	4634
039	6294	720	860	1180	5019

### 5.3 エンジンの過渡特性

全シリーズの試験で得たエンジンの過渡特性を一括して表 8 に示すが、同表の符号は図 19 に示されている。

エンジンの過渡特性はバルブ類の開閉タイミングの設定条件により変るものであるが、この試験における残留力積とバルブのタイミングとの関係は図 20 に示すようなものである。但し、この残留力積を求めるに当っては、燃焼圧力が降下してデフューザがブレイクダウンを起す時点で正しい推力の計測ができなくなるので、燃焼圧力  $P_c = 5$  以降  $2 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  の間は燃焼圧力を基準として力積を求め、それ以後は大気圧燃焼実験における高リスボンズ燃焼圧力測定データを外挿して得た力積を試験毎の推力係数で補正した。

$$I_R = \int_0^{t_{P_{c1}}} F_V dt + \int_{t_{P_{c1}}}^{t_{P_{c2}}} P_t \cdot C_F \cdot V \cdot A_t dt + 294 C_{FV} / 1.795$$

ここで  $t_{P_{c1}}$  は停止信号から  $P_c = 5 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  になるまでの時間であり  $t_{P_{c2}}$  は同様に  $P_c = 2 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$  になるまでの時間である(図 19 参照)。

### 5.4 エンジン振動

エンジン振動はその頭部にとり付けた加速度検出器により 3 方向の振動レベルが計測されたが、推力軸方向の振動はエンジン側で用意した振動危急停止装置 (VSC 装置) から分岐し、他の半径方向および周方向の振動は設備側計測系からアナログテープに収録した。

12号(原型)エンジンでは図 21 に示されるような Pop あるいは Football 状の異常振動が現われるものもあったが、完成エンジンではこのような現象はみられなかった。Pop あるいは Football は次の試験でみられた。

Pop	KT-007	エンジン・スタート後 13 秒
	KT-008	" 3 秒, 13 秒
	KT-009	" 10 秒
Football	KT-009	" 2.5 秒

3 方向の  $g$  レベルを比較すると、ほとんど同程度のものであったが傾向としては、(推力軸方向) > (半径方向) > (周方向) の順であった。

アナログ・カーブから読みとった推力軸方向の  $g$  レベルを図 22, 23, 24 に示すが、完成エンジンにおける  $g$  レベルの低減はエンジンの始動時および停止時において特に顕著である。

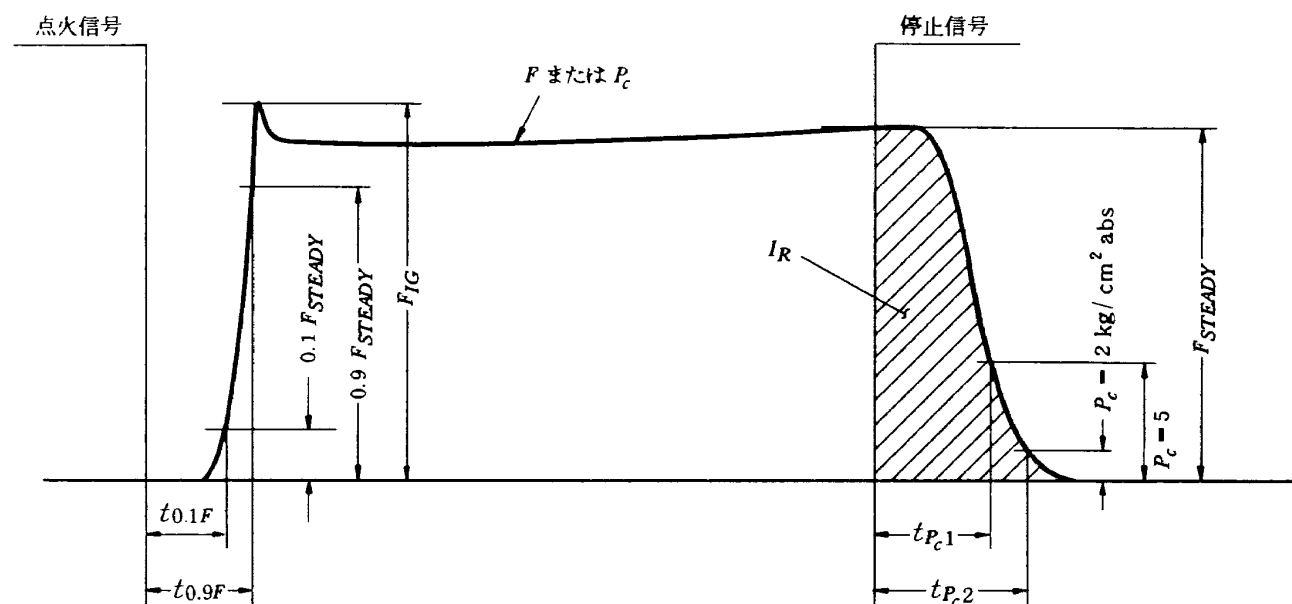


図 19 表 8 で用いた符号

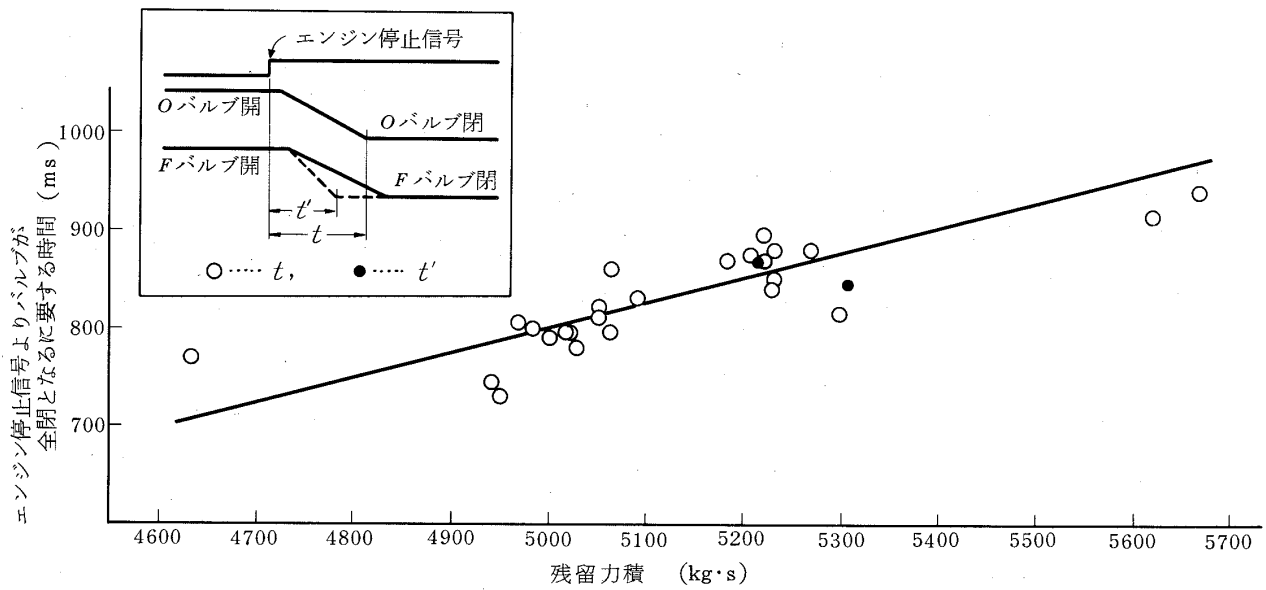


図 20 残留力積とエンジン・バルブの全閉時間

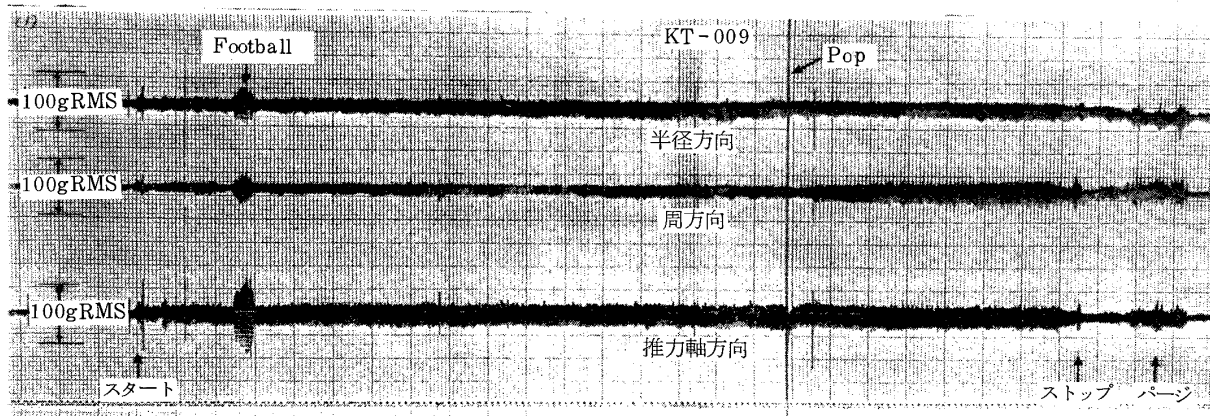


図 21 エンジン振動



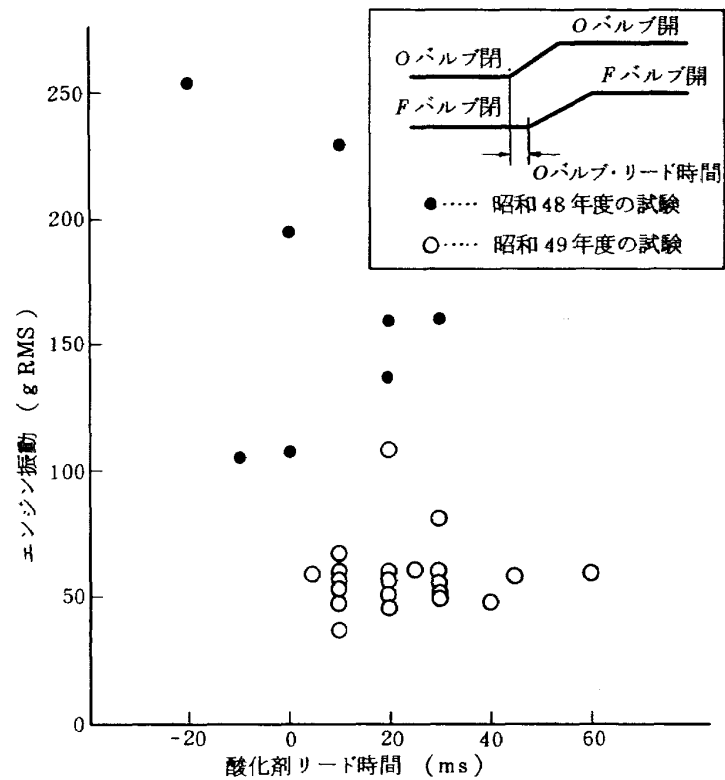


図 22 エンジン始動時の振動

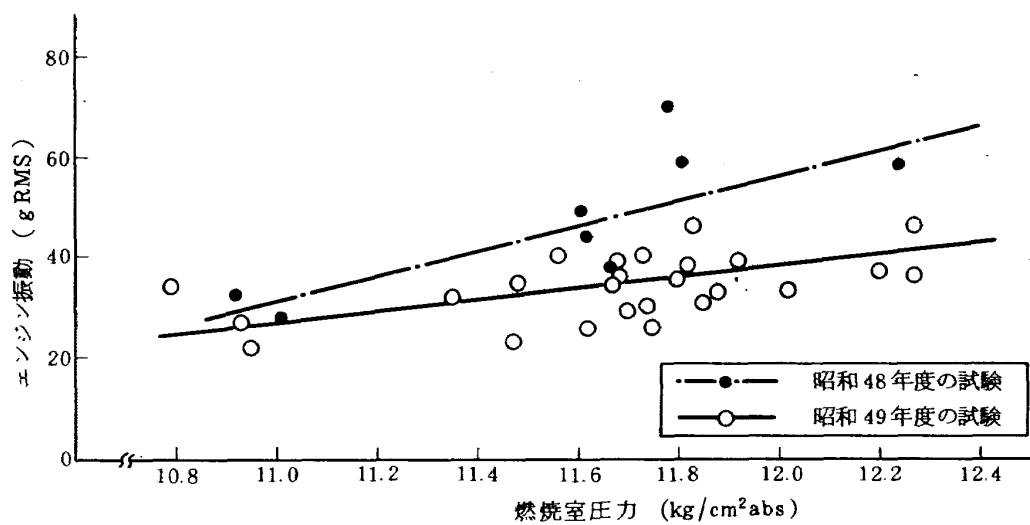


図 23 定常燃焼時のエンジン振動

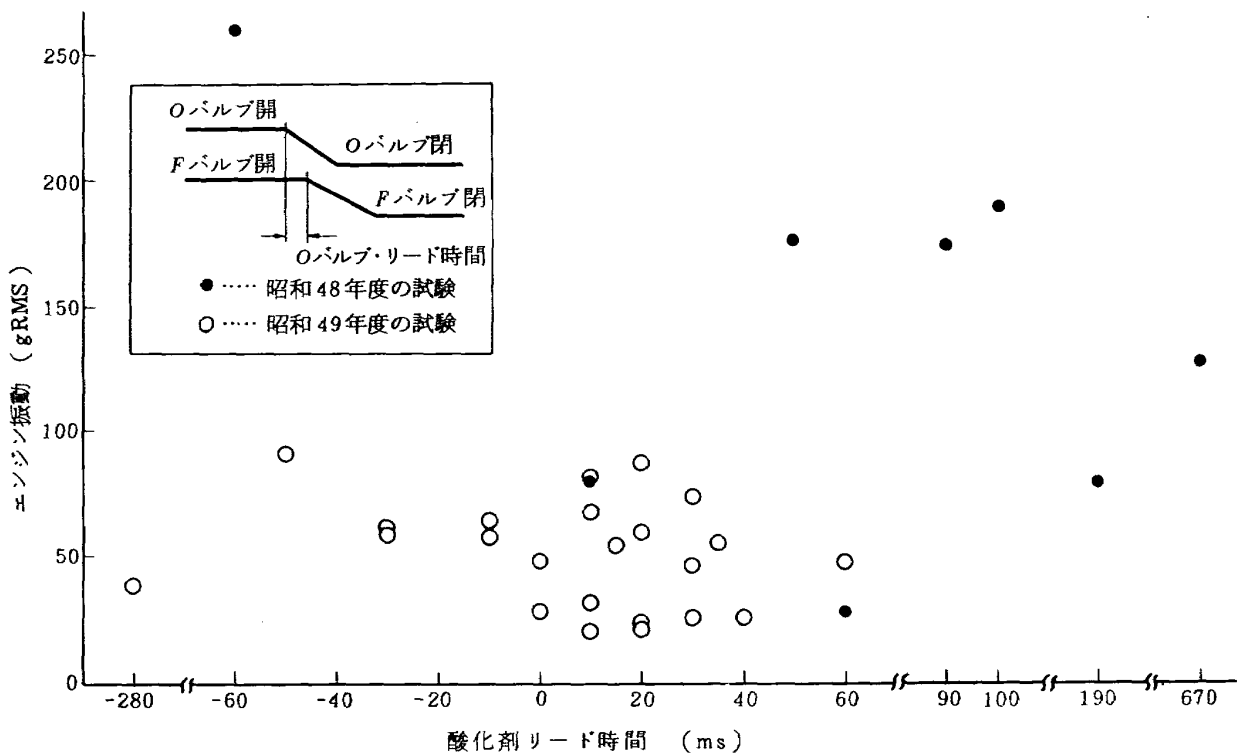


図 24 エンジン停止時の振動

## 6. 試験結果の解析

### 6.1 計測精度

この試験における計測精度は、センサ毎にそれぞれの計測システムと組合せた総合精度として、すでに、表 2 に示されているが、各計測項目の各回の較正精度をプールした平均的な精度は次のように考えられる。

$$P_{r \cdot pool} = \pm \left( \frac{\sum P_{r \cdot i}^2}{n} \right)^{1/2}$$

すなわち、推力の計測における総合的な精度は次のようになる。

$$P_{r(F)pool} = \pm \left( \frac{0.21^2 + 0.21^2 + 0.20^2 + 0.30^2 + 0.12^2 + 0.11^2}{6} \right)^{1/2} \\ = \pm 0.20 \%$$

同様に、エンジンの性能計算に關与する各計測項目の総合的な精度を求めれば次のようになる。

$$P_r(P_c)_{pool} = \pm 0.24 \%$$

$$P_r(Q_O)_{pool} = \pm 0.37 \%$$

$$P_r(Q_F)_{pool} = \pm 0.33 \%$$

$$P_r(P_a)_{pool} = \pm 0.67 \%$$

上記の計測項目のうち環境圧力以外のものは、センサ 2 個による計測がなされ、その平均をとっているため、このようなときの精度はさらに、次のように考えられ、

$$P_{r \cdot avg} = \frac{P_{r \cdot pool}}{\sqrt{2}}$$

これを上記の計測項目に適用すれば、本試験における重要計測項目の総合的な精度は次のとおりである。

$$P_r(F)_{avg} = \pm 0.14 \%$$

$$P_r(P_c)_{avg} = \pm 0.17 \%$$

$$P_r(Q_O)_{avg} = \pm 0.26 \%$$

$$P_r(Q_F)_{avg} = \pm 0.23 \%$$

また、上で得た  $Q_O$ 、 $Q_F$  の精度から、 $I_{sp}$  を求める際の推進薬流量の精度は次のとおりである。

$$P_r(Q_T) = \pm (0.26^2 + 0.23^2)^{1/2} = \pm 0.35 \%$$

次に、上記の各計測項目の精度により決まるエンジン性能の精度を求めると次のとおりである。

計測値  $(x, y, z, \dots)$  の関数  $f(x, y, z, \dots)$  へのバラツキの伝播は次式であらわされる。(但し、 $x, y, z, \dots$  は互に独立)

$$\sigma^2[f(x, y, z, \dots)] \\ = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \sigma^2(x) + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \sigma^2(y) + \left( \frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \sigma^2(z) + \dots (1)$$

これを真空推力を求める式  $F_v = F + A_e \cdot P_a$  に適用し、ノミナル値 (NOM) を用いて表わすと式(2)を得る。

$$\sigma^2_{(F_V)} = \sigma^2_{(F)} + A_e^2(NOM) \sigma^2_{(P_a)} + P_a^2(NOM) \sigma^2_{(A_e)} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } P_r(F_V) = \sigma_{(F_V)} / F_V(NOM)$$

$$P_r(F) = \sigma_{(F)} / F(NOM)$$

$$P_r(P_a) = \sigma_{(P_a)} / P_a(NOM)$$

$$P_r(A_e) = \sigma_{(A_e)} / A_e(NOM)$$

と仮定してこれらを式(2)に用いて次の関係を得る。

$$P_r^2(F_V) \cdot F_V^2(NOM) = P_r^2(F) \cdot F^2(NOM) + P_r^2(P_a) \cdot P_a^2(NOM) \cdot A_e^2(NOM) + P_r^2(A_e) \cdot A_e^2(NOM) \cdot P_a^2(NOM) \quad (3)$$

前に示した各計測項目ごとの総合的精度およびノミナル値を式(3)に代入して真空推力を得る。

$$P_r^2(F_V) = 0.966 P_r^2(F) + 0.000305 P_r^2(P_a) + 0.000305 P_r^2(A_e) = 0.01906 + 0.000305 P_r^2(A_e) \quad (4)$$

この試験ではノズル出口面積の測定はしておらず、したがってその製作精度が不明なので、式(4)の右辺の第2項を除外すれば、当所の計測システムの精度によって決まる真空推力の精度は次のように求まる。

$$P_r(F_V) = \pm 0.14 \%$$

これは推力計測の精度 ( $P_r(F)_{avg} = \pm 0.14 \%$ ) に支配され、先に示した環境圧の精度 ( $P_r(P_a)_{pool} = \pm 0.67 \%$ ) はきいてこない。

エンジン性能を評価するパラメタの精度に対する依存関係を同様にして求めると、

$$P_r^2(C^*) = P_r^2(P_c) + P_r^2(Q_T) + P_r^2(A_t) \quad (5)$$

$$P_r^2(C_{FV}) = P_r^2(F_V) + P_r^2(P_c) + P_r^2(A_t) \quad (6)$$

$$P_r^2(I_{SPV}) = P_r^2(F_V) + P_r^2(Q_T) \quad (7)$$

ノズルスロート径の測定精度は0.027%であり、スロート面積の精度になおすと、 $P_r(A_t) = \pm 0.054 \%$ となる。上記の値とこれまでに示した  $P_c$ ,  $Q_T$ ,  $F_V$  の精度を上式に代入して、当所の計測システムによるエンジン性能の精度は次のように推定される。

$$P_r(C^*) = \pm 0.39 \%$$

$$P_r(C_{FV}) = \pm 0.23 \%$$

$$P_r(I_{SPV}) = \pm 0.38 \%$$

## 6.2 実験誤差

同一エンジンで試験を繰り返す際の誤差はすでに、表5, 6に示されており、試験回数の少ない場合はかなりのバラツキを示している。エンジンが変わってもバラツキが変わらないという仮定のもとにこれらの誤差をプールして表9に示した。同表には95%信頼度で推定されるバラツキの範囲およびそれぞれの平均値に対するバラツキの割合も示されており、これらのデータによれば、ほぼ満足なデータが得られたものと推定される。

## 6.3 完成エンジンの性能

ここで試験された完成エンジン8台は同一スペックで製作されたものであり、また同スペックで今後とも製作されるであろうと思われる無限母集団からのサンプルとも考えられる。

完成エンジン8台の性能は、それぞれ、2回の試験の平均値として表5に示されているが、この平均値の平均および平均値のバラツキを求めて、前記の母集団を推定すれば表10のとおりである。

表9 実験誤差の重み付け平均およびバラツキの範囲

		$\hat{\sigma}_{e, pool}$	$\pm 2\sigma$	%
$C^*$	m/s	2.8	$\pm 5.6$	0.35
$C_{FV}$	—	0.0023	$\pm 0.0046$	0.26
$I_{SPV}$	s	0.39	$\pm 0.78$	0.27

表10 完成エンジンの性能およびエンジン間のバラツキ

		性能 ( $\bar{x}$ )	バラツキ ( $\hat{\sigma}_x$ )
$C^*$	m/s	1586.5	2.9
$C_{FV}$	—	1.7946	0.0034
$I_{SPV}$	s	290.36	0.76

## 7. む す び

以上の結果により、今回の高空性能試験は要求される試験条件および計測精度を満たすこと、また、得られた LE-3 型エンジンの諸性能は、要求を満たすものであることが確認された。

なお、この試験は宇宙開発事業団からの委託により行なわれたもので、宇宙開発事業団エンジン開発グループの荒卓哉、加山昭、藤田敏彦、森雅裕、長嶋隆一の諸氏、ならびに三菱重工業㈱名古屋航空機製作所の関係者各位の協力をいただいて実施されたものであり、ここに厚くお礼申し上げる次第である。また、ノズルスカートの強

度に関連する問題は当所機体第 2 部中井暎一、埴武敏、戸田勲、寺田博之、機体第 1 部古賀達蔵、および、宇宙研究グループ山中龍夫の諸氏に検討をいただいたことを付記し、深い感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 荒 ほか：N ロケット第 2 段エンジン (LE-3) の開発 NASDA TR-6 (1976)
- 2) 大塚 ほか：航空宇宙技術研究のロケット・エンジン高空性能試験設備 NAL TR-454 (1976)
- 3) NAL/NASDA：高膨張エンジンのノズルスカート構造強度の研究 共同研究報告 (昭 52)

---

## 航空宇宙技術研究所報告 364 号

昭和 53 年 8 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町 1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山 4-1-7(羽田ビル)

---

