

TVC の 地 上 試 験

秋 葉 鎌二郎・倉 谷 健 治・長 友 信 人

1. 序 論

東京大学の科学衛星計画では、3号衛星以降は、燃焼中の主推力方向を制御し、衛星軌道を次第により高精度なものとする事となっている。このため、宇宙研では、昭和41年度におけるきわめて基礎的で小規模な実験に始まり、次第に大型のロケットモータの推力方向制御の地上実験を重ねてきており、飛しよう実験の面でも L-4 SC-1 までの K, L 型による3回の実績をもつに至っている。

ここでは、これらの開発研究のうち、特に地上燃焼実験に関する部分を概説、整理してみることとする。

2. TVC 方式に関する検討

固体ロケットの主推力方向制御としては、

- (a) ジェット ベイン (jet vane)
- (b) ジェッテベータ (jetevator)
- (c) 首ふり ノズル (swivelling nozzle)
- (d) 2次噴射 (secondary gas or liquid injection)

が現在採用されている手段のおもなもので、それぞれ一長一短がある。それらを表にしてみると第1表の様になるう。

このほか、燃焼中に姿勢を変える目的では動翼とか補助ロケットが考えられるが、前者は、動圧が大きい範囲のみ有効で、単独では不十分であるし、後者は大きな制御力を長い秒時出すには不向きであるので、ここでは除外した。

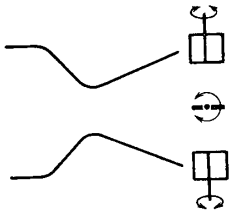
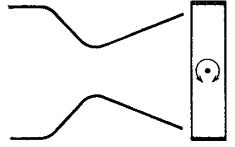
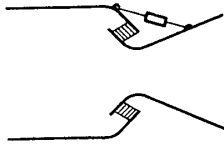
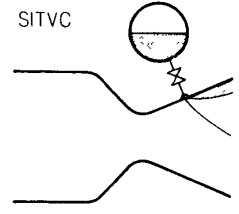
結局、現在最後まで候補として残るのは、可動ノズルと二次噴射 (SITVC) となる。ここで、前者について軽量な可撓性シールの考えが出され実用性が確かめられたのは、比較的最近のことである。

また当時、モノプロペラントモータとして姿勢制御用の L, M 用の過酸化水素エンジンが実用されており、SITVC 噴射液のフィードシステムに関する技術面については若干の経験があったが、一方可動ノズル駆動用の油圧系はほとんど未経験であった。1966年頃としては、これらの点を考慮し、SITVC が最も容易に実現し得る大型固体ロケットの推力方向制御法であるとして開発を進めることとなったのである。

3. SITVC 性能に影響する諸要素の選択

SITVC とは2次流体噴射推力制御であるが、流体としては、最初から、液体を考えた。

第1表 各種 TVC の性能比較

方 式	利 点	欠 点
ジェットヘイン 	ロール制御可能	推力による I_{sp} 損失 耐熱性の要求が酷しいので重い
ジェットベータ 	推力による I_{sp} 損失 が少ない	シングルノズルでは ロール制御ができない 重い
可動ノズル  (ロックシール型)	推力による I_{sp} 損失 がない	可動部分が hot gas にさらされる 寸法変動量が大となる 可能性がある シングルノズルでは ロール制御ができない
SITVC 	弁以外の可動部分が ない 作動時間やモータの 大きさに対し広範囲 に適應性がある 応答性がよい	シングルノズルでは ロール制御ができない 噴射流体が余分の搭 載物となる

噴射体が液体の場合、LITVC と略する。

SITVC 性能に影響する諸要素を列举すると、

- i) 噴射液の種類
- ii) 主流の組成
温度、圧力、マッハ数、比推力等
- iii) インジェクタ（噴射孔）の位置、数、大きさ
- iv) 噴射方向とノズル壁との間の角

v) 噴射圧

vi) 主流と噴射流との流量比, または縦横推力比

vii) ノズルの寸法, 形状

SITVC の性能を評価する基準のうち, 最も重要なものは, 主推進系の比推力に相当する横方向比推力すなわち, 横方向推力を噴射液流量で割ったもので, 横方向比推力 I_{sp} と称する. これとならび SITVC の場合には, 横方向に関する体積インパルスもまた評価基準として大きな意味をもつ.

3.1 噴射液の選択

噴射液の種類は, モータ性能における推薬と同様 TVC に関し, 大部分の性能を決定する要素である. 現状では噴射液選定上の指針となる万能な理論はないので, 開発の初期より現在まで可成の種類が試験的に実験された. ざっとこれらを列記すると,

- (1) フレオン 12, 22, 113, 114 B₂
- (2) プロパン
- (3) ニトロメタン
- (4) 過酸化水素
- (5) 過塩素酸ストロンチウム水溶液

これらの性能は必ずしもすべて厳密に求められたものではないが, 取扱いや入手の点を考え, 大型のもので実験されたものは, フレオン 22, フレオン 114 B₂, 90% 過酸化水素, 63% 過塩素酸ストロンチウム水溶液に止まっており, 特にフレオン 114 B₂ と 90% 過酸化水素によるものの試験数が多い.

初期においては, 直径 60φ 長さ 200 mm 程度の小型モータで噴射液の性能評価を試みたが, 一般に寸法効果が強くあらわれ, たとえば噴射液に水を用いても, 過酸化水素を用いてもほとんど同程度の性能しか得られないなど, 比較試験としても不十分であったので, 現在ではこの種試験は参考程度に考えられている.

これら噴射液は, 必ずしも主推薬の様に低分子量の生成ガスとはならないが, いずれも分解性, または主流との燃焼性をもっている.

LITVC では補助ロケットと同様, 構造重量を少なくすることと, せまい空間にシステムを収納する目的で, volume impulse が大きいことが望ましいから, 意識的に密度の大きい液体が用いられた.

第 2 表は, フレオン 114 B₂, 過酸化水素および過塩素酸ストロンチウムについて, 噴射液としての特性をまとめて表にした.

このほかアメリカでは, 液体ロケットとの共用性の利点もあって N₂O₄ が好んで使われるが, 入手性および取扱の点でわれわれは試みていない.

また, 過酸化水素は, これを用いる補助ロケット, 特にロールジェットとの共用性があるので, 初期においてはその高性能とともに有望規されたが, K-10 C-2 における飛しよう実験において大量の過酸化水素が漏洩するという事故があったため, 現在では飛しよう用にはほぼフレオン 114 B₂ 一本にしぼっている.

ただし, 過塩素酸ストロンチウムは, これをやや上回る性能をもつので将来併用される可

第 2 表 噴射液の諸特性

噴射液	比重	沸点 °C (1 atm)	I_{sps} sec (流量化 2%)
フレオン 114 B ₂	2.16 (25%)	47.3	150
90% H ₂ O ₂	1.31 (20°C)	151 (100% H ₂ O ₂)	290
Sr(ClO ₄) ₂ 水溶液	1.87	—	220*

* 資料 (1) による値

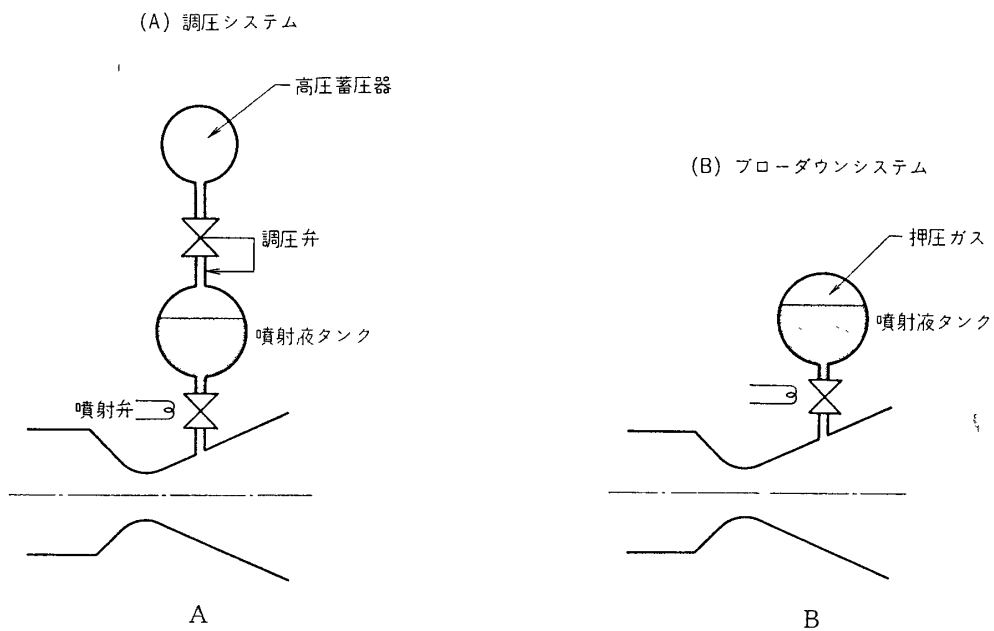
能性はないとはいえない。

3.2 供給系 feed system

LITVC の供給システムで現在われわれが用いているのは第 1 図 (A), (B) に示されるようなガス押し方式である。(A) は高压の蓄圧器に入れた押しガスを調圧弁で減圧し、これにより噴射液を押し出す方式、(B) は特に高压蓄圧器や調圧弁を用いず、予圧した押し圧で単純に噴射液タンクより噴射液を押し出す。いわゆる blowdown 方式である。(B) の場合は噴射を伴う押しガス圧力が降下するので、噴射流量は尻下りとなり、制御力は初期に大きく、終期に小さくなることとなる。

噴射弁については節を改めて述べる。

供給系に関し、従来いわれており、またわれわれとしても確認した主な事項は以下のごとくである。



第 1 図 供給系説明図

i) 噴射孔

噴射孔については、位置、個数、噴射方向が横推力に影響する。位置としてはノズルの開口比を ε_0 、噴射位置の面積比を ε_j として $\varepsilon_j/\varepsilon_0=0.2\sim 0.4$ が LITVC に対して適当であるといわれているが、噴射量や噴射液の種類にも影響される。この位置の多少の変化は、性能に対してそれほど大きな影響を与えない。

噴射孔の個数は円周上に多くあけ、1 個当り噴射量が少ない方が横方向比推力は向上する。また、信頼性の観点からも噴射孔を多く設けることは好ましい。

噴射方向の流れに対する傾きもまた横推力に影響する。LITVC では、面に直角方向より上流に向かって $30^\circ\sim 40^\circ$ が最大の比推力を与えるようであるが、通常、実際には加工の点を考慮し、ノズル軸に直角方向に穴をあけるので、 $15^\circ\sim 17^\circ$ くらいにとられている。

ii) 噴射量

噴射量は、制御の要求、バルブの能力および横比推力等を勘案してきめる。

一般的に噴射量が増すに従がい、横比推力はかなり著しく減少する。この関係はあとに実験結果のところで示される様に、主流と噴射液の流量比 \dot{w}_j/\dot{w} との相関によってあらわされる。

iii) 噴射圧力

噴射圧力は噴射液の主流への進入高さにきくため、大きくとる程横比推力は増す。しかし、実際問題としては、燃焼室圧すなわち、主流のよどみ点圧力の程度にとれば十分である。

iv) 大きさの影響

LITVC の場合は、噴射液の主流への進入、噴霧化、混合、蒸発、分解、反応に要する時間が大きい意味をもつから、噴射体のノズル中に存在する時間が大きくとれるほど、すなわち一般に大型ノズルであるほど横比推力は大きくなる。

v) その他

二次流体噴射により主推力がわずかに増加する。性能上これを生かして使うには噴射液の使用量が制御の過程に依存しない様な制御法としなければならないので、単純に利得と考えるべきものではない。

また制御上レスポンスが問題になるが、噴射液が噴射されて以後横推力が発生する時間は原理的にきわめて短かく $1\sim 2$ msec であるが、フィード系のおくれは数 10 msec 程度で、制御上考慮せねばならない大きさとなる。

3.3 噴射弁

今までのところ、大部分の地上燃焼実験には ON-OFF バルブを使用している。

ON-OFF バルブでソレノイド直動式のもは、流量にして数 10 cc/sec の辺が限度で、これ以上のものはパイロット動作になっているものが大部分である。

国産では、搭載まで考慮して LITVC に適合する様な特性のものがないので、地上試験においても大部分輸入品を採用した。しかし輸入品でも飛しよう時の信頼性まで考えれば、今まで地上試験に採用してきたバルブも必ずしも満足なものでなく、今後さらに吟味を必要とするものが多い。

また、将来1段目 TVC の様に大きな制御力を必要とするときには、比例弁の方が急激な衝撃を避ける意味からも、入手しやすさからも適合すると思われるので、これに対する予備的な実験を現在計画し、実施しつつある。

4. TVC 地上実験結果の概要

第3表は、現在まで実施したK以上のモータに関する TVC 試験の条件および主要な結果を表にしたものである。

そのおのおのについて以下に若干の解説を加える。

4.1 過酸化水素系

i) $420 \times 1,000 \text{ V (H}_2\text{O}_2)$ (42.7.21 実験)

○目的: K-10 C-2 の2段目 TVC の地上試験の予備として、大型モータで過酸化水素の噴射液としての特性を測定し、あわせて取扱上の問題点を検討する。

○噴射シーケンス

燃焼中、左右2回、上下2回および下、左の同時噴射を行ない、各噴射時間の幅は2secで、それぞれ0.5secの間隔をおいて噴射した。

○おもな結果

きわめて高い横比推力が確認された。この値は流量比に対し、第2図にプロットされている。噴射量は小型モータ(110φ)により日産で求められた $I_{sps}=130 \text{ sec}$ を仮定して設計し、主横推力比1%を目標としたが、 I_{sps} の増加により2%前後の値となった。

また実験初期に洗浄に使ったパイプ中に残存していた水が噴射されたので、第一回目の噴射では $I_{sps}=63 \text{ sec}$ であった。

ii) $420^{1/3} \text{ V (H}_2\text{O}_2)$ (42.10.28 実験)

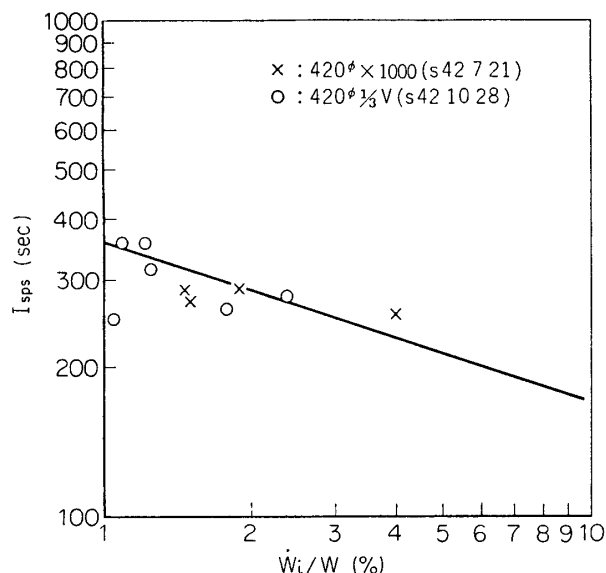
○目的: K-10 C-2 の2段目の地上燃焼実験

○シーケンス

燃焼中、左右上下各1回、およびノズル後方よりみて右、下の同時噴射を行なった。各時間幅は2sec、それぞれ0.5secの間隔をおいた。

○実験装置

懸吊式4分力スタンド上に実機スタイルの供給系(K-10 C-2 飛しよう用とは設計が異なっている)をつけた $420^{1/3}$ モータをとりつけた。ただし、流量測定のための供給装置

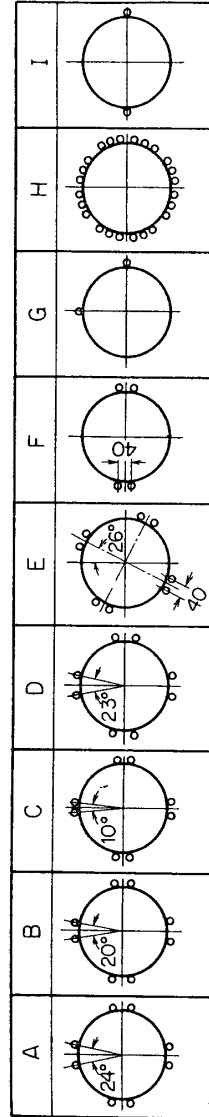


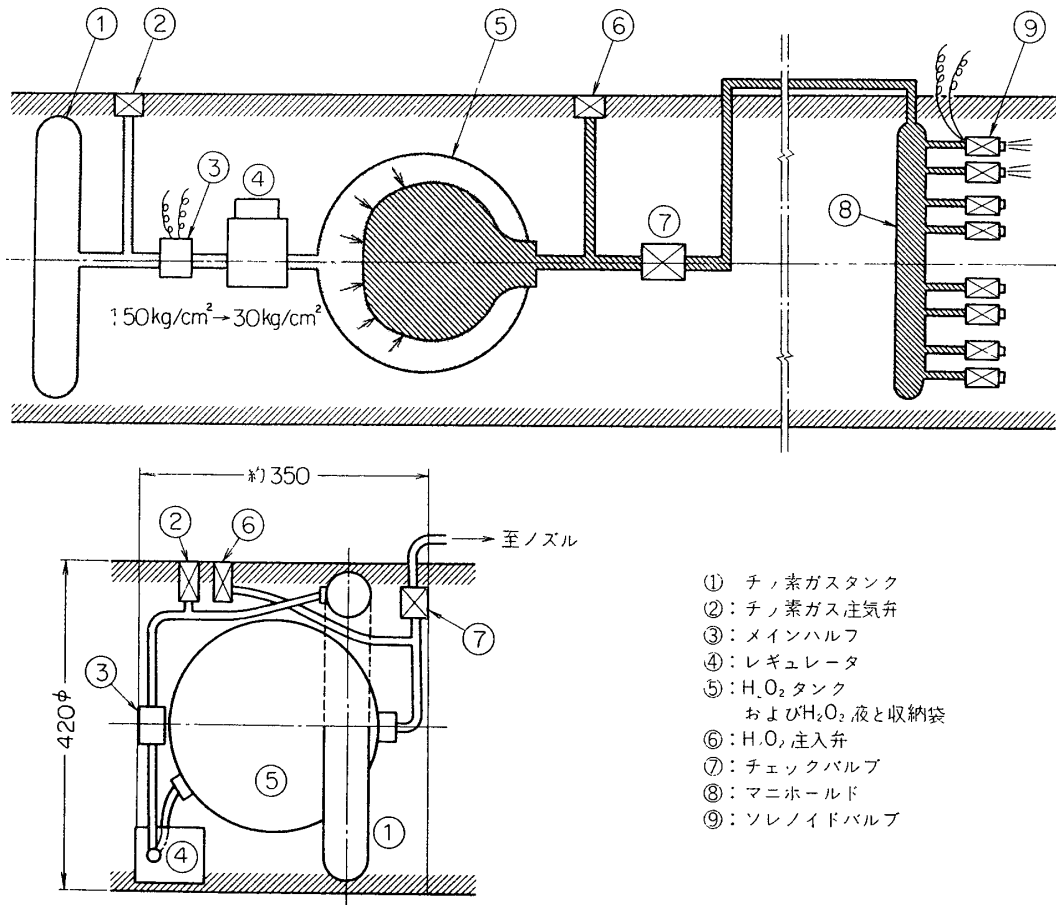
第2図 流量比と横比推力の関係 (90% H₂O₂)

第 3 表 TVC 地上燃焼実験一覧表

モータ名称	年月日	推薬	平均 推力 F_p (ton)	有効燃 焼秒時 τ (sec)	噴 射 液	横推力/主推力	制 御	噴射 角 θ_i (°)	噴 射 位 置		ノズルス ロート径 D_i (mm)	フイ ード系	供給圧力 P_s (kg/cm ²)	実験 条件
									タイプ	ϵ_i/ϵ_e				
1 420 ¹ / ₃ V	42. 7. 4	UP-10	3.76	13.47	フレオン 22	1.0~1.3	ON-OFF	12.5	A	0.44	93	レギ ュー タ	47	大気
2 420×1,000 V	42. 7. 21	UP-10	2.80	13.46	H ₂ O ₂ (90%)	0.64~3.84 合成時	ON-OFF	12.5	B	0.44	64	レギ ュー タ	30	大気
3 M-20 TVC	42. 8. 19	UP-18	23.8	50.7	フレオン 114 B ₂	1.16	ON-OFF	17.0	C	0.34	220	レギ ュー タ	50→30	大気
4 420 ¹ / ₃ V	42. 10. 28	UP-10	3.70	13.8	H ₂ O ₂ (90%)	1.1~2.5	ON-OFF	18.0	D	0.52	93	レギ ュー タ	30	大気
5 500 TVC-1	43. 3. 28	BP-17	4.04	27.6	フレオン 114 B ₂	0.75~0.84	ON-OFF	17.0	E	0.43	107	レギ ュー タ	30	真空
6 420 ループ	43. 4. 18								A (左右のみ)	0.36				大気
7 L-735 ¹ / ₃ TVC-2	43. 12. 25	BP-17	10.4	40.4	フレオン 114 B ₂	1.76~1.90	ON-OFF	15.0	E	0.44	141	ブ ロ ン ダ ウ ン	70→20	大気
8 500 TVC-2	44. 4. 28	BP-17	4.00	26.25	フレオン 114 B ₂		ON-OFF	12.5	F	0.35	95	レギ ュー タ	30	大気
9 M-30-2 TVC	45. 4. 5	BP-12	12.39	33.73	フレオン 114 B ₂	0.82~1.09	ON-OFF	17.0	G	0.52	160	レギ ュー タ	30, 50	真空
10 300 TVC	45. 4. 27	UP-10			フレオン 114 B ₂	CCW 2.7(5 sec) UP 3.0(9 sec)	ON-OFF	12.0	G (水平と 垂直と)	0.40	160	レギ ュー タ	50	大気
11 M-11-1 TVC	45. 6. 26	UP-10	97.4	57.06	フレオン 114 B ₂	CW 2.7(13 sec)	ON-OFF	15.9	H	0.42	466	レギ ュー タ	24.7~ 48.2	大気
12 L-735 ¹ / ₃ TVC-2	45. 7. 1	BP-18	10.7	37.3 (75%)	フレオン 114 B ₂	1.2~2.0	ON-OFF	15.0	E G	0.62	141	レギ ュー タ	64→22	真空
13 300(SB)TVC #1	45. 11. 16	UP-10	13.3	4.5 (75%)	ストロンチ ウムペ ロレー ト水溶液	0.22~1.68	比例	12.0	G (右側で +45°)	0.40	160	レギ ュー タ	36	大気
14 300(SB)TVC #2	46. 11. 28	UP-10	15.05	5.02	ストロンチ ウムペ ロレー ト水溶液	0.13~3.57	比例	12.0	I	0.30 0.40	160	レギ ュー タ	51~34	真空

別定位置タイプ





第3図 TVC 供給装置のブロック図(上)と実際の配置図(下)

と噴射マニホールドの間に流量計を入れた。(第3図に供給系系統図を示す.)

○計測項目

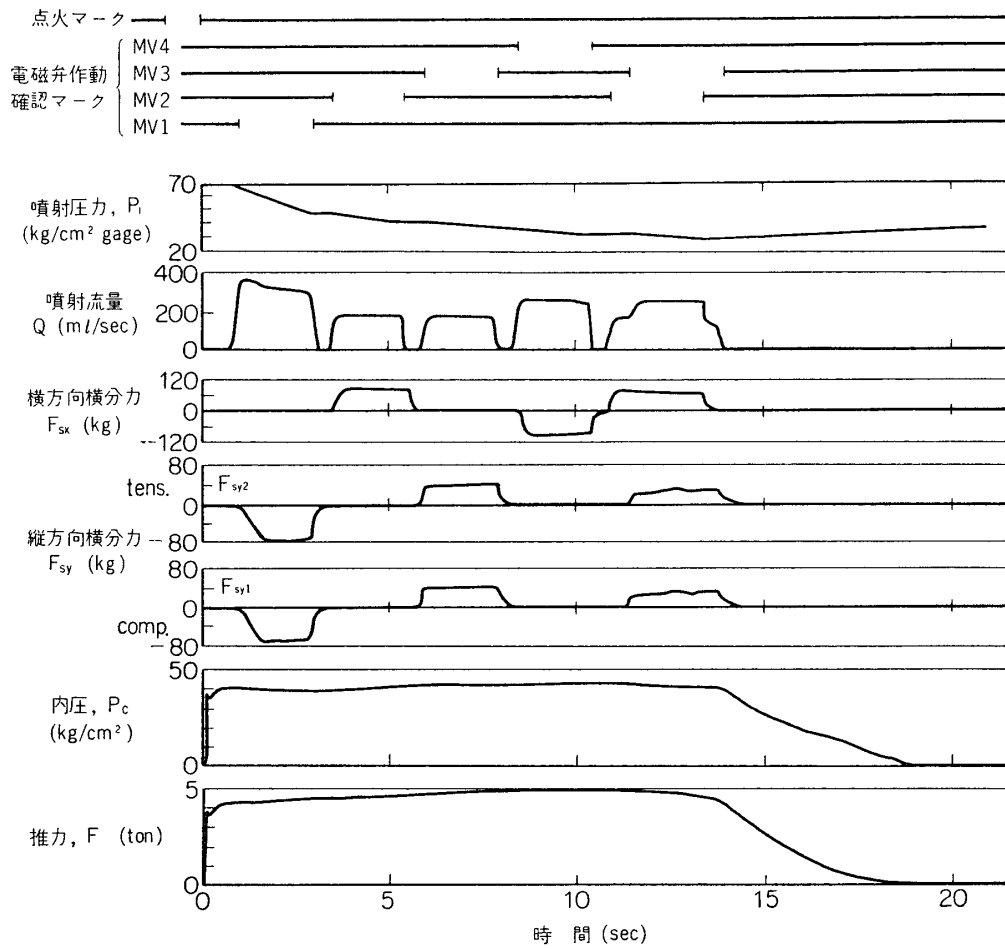
このサイズは代表的なものなので計測項目を列举すると、

主モータ	推力, 内圧	各2点
TVC	上下分力	4点
	左右分力	2点
	電磁弁作動信号	4点
	噴射圧	1
	流量	1点
	温度	4点
	噴射確認用圧力スイッチ	4点

なお、横推力の測定回路には Low pass filter を入れ、スタンド計測系の振動を除去した。

○計測結果 (第4図)

○主な結果



第 4 図 420 1/3 V (42-10-28) 諸データ

前回同様の高い横比推力が確認された。この値も第 4 図にプロットした。同図より I_{sps} と流量比の関係は

$$I_{sps} \propto \left(\frac{\dot{w}_t}{\dot{w}} \right)^{1/3}$$

の関係がみられる。

本実験に使用したノズルは FRP ノズルであったが、二次噴射による衝撃波の跡が侵蝕の跡としてみられる。

(第 5 図写真)

また、この実験で、主推力の二次噴射による増加分が始めて計測上識別された。この増加分は 15~30 kg で主推力の 1% くらいである。理論的には、 α をノズル半開角として $F_s \tan \alpha = F_s \tan 18^\circ = 0.325 F_s$ のはずで



第 5 図 噴射孔付近の FRP 侵蝕状況

ある。

4.2 フレオン系

i) 420¹/₃ V (Freon 22) (42.7.20 実験)

○目的: PT-420-1 の地上試験

○シーケンス

420×1,000 V (H₂O₂) と同じ。

○フィード系

PT-420-1 用のものを使用。ただし、流量測定のため一部変更。

○主な結果

横方向比推力は流量比 2~3% で約 110 sec の値が得られた。計画値は噴射圧を 50 kg/cm² としたが、feed 系の圧力損失でバルブ直前においては 35 kg/m² 程度となった。このため主横推力比はほぼ 1.3% と計画値を下回り、飛しようまでに修正を加えることとなった。しかし実際には、以後の計画との連続性を考え、PT-420-1 の噴射液は Freon 114 B₂ に変更した。

ii) M-20 TVC (Freon 114 B₂) (42.8.19 実験)

○TVC に関する実験目的

大型モータにおける Freon 114 B₂ を用いた TVC 特性の確認

○供給系およびシーケンス

地上試験用の供給系を特に作製した。(第6図)

燃焼秒時が長いので、押圧を前期 50 kg/cm²、後期 30 kg/cm² の2段階に設定した。

シーケンスは、前後期ともに上下左右各1回および、左、下の同時噴射を行なった。

スタンドは懸吊式4分力であった。

○おもな結果

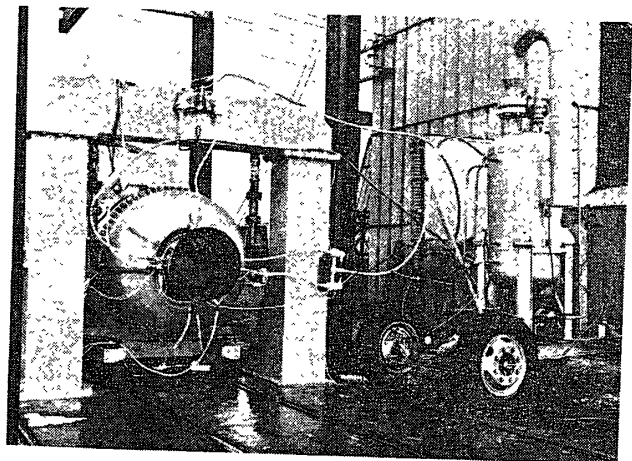
Freon 114 B₂ を用いた大型モータの初めてのものであった。それまでの日産自動車における小型モータでの I_{sps} は噴射圧 50 kg/cm²、 $F_s/F=1\%$ で $I_{sps}=140$ sec であったが、

$$\frac{\dot{w}_i}{\dot{w}}=1.35\% \quad \frac{F_s}{F}=1.00\% \quad \text{で } I_{sps}=167 \text{ sec}$$

$$\frac{\dot{w}_i}{\dot{w}}=3.70\% \quad \frac{F_s}{F}=2.02\% \quad \text{で } I_{sps}=121 \text{ sec}$$

となり、寸法効果がこの場合も大きいことが示された。

Freon 114 B₂ について、噴射液として取扱の容易さ、volume impulse が大きいことが確



第6図 M-20 TVC 供給系

認され、この実験以降、大部分の実験が Freon 114 B₂ を用いて行なわれることとなった。ただし、M-4 SC の 2 段目としての M-20 TVC 実験としては、供給系、バルブ等が地上試験専用であったので不完全であり、将来の課題として残ることとなった。

iii) 500 TVC-1 (Freon 114 B₂) (43.3.28 実験)

○目的: L-4 SC の 3 段モータの TVC 特性の確認

ブタジェン系推薬の場合の TVC 性能の評価

○供給系、およびシーケンス

実機搭載型とし、すべてノズル周辺に組付けた。このため流量は直接測定することができなかった。左右上下各 3 秒 1 回ずつおよび、ノズル後方よりみた左と下の同時噴射。各噴射は 1 sec の間隔をおいた。

○試験条件

TVC に関する初めての真空燃焼であった。噴射ポートの軸方向位置としては、 $\varepsilon_i/\varepsilon_e = 5.66/12.9$ とした。これには実際設計上の制約も加味した。スタンドは懸吊式 4 分力。

○おもな結果

$F_s/F = 0.75 \sim 0.84\%$ の範囲で、 $I_{sps} = 130 \sim 150$ sec が得られた。ただし、流量測定が燃焼時にできなかったので信頼度は多少落ちる。真空中においても安定した性能を示した。

iv) L-735¹/₃ TVC (Freon 114 B₂) (43.12.25 実験)

L-4 SC 第 2 段目の TVC 地上実験を目的として、実機搭載型をそのままノズル回りにとりつけた型で真空燃焼実験を試みたが、燃焼実験で点火後 8.8 秒で停電、ノズル後方よりみて左、上の各 1 回のみの噴射しか実施できず不完全な結果となり、同様の実験を繰り返すこととなった。(vi) 項)

v) 300 TVC-1 (Freon 114 B₂) (45.4.27)

M-11 TVC の予備試験として、M-11 のスタンド特性、試験器材、バルブなどコンポーネントの動作確認を目的とした。これにより得られた M-11 テストスタンドの特性に関しては、本特集号の該当項目を参照されたい。

vi) L-735¹/₃ TVC-2 (Freon 114 B₂) (45.7.1 実験)

○目的: L-4 SC 2 段目 TVC の特性確認

○供給系およびシーケンス

実機搭載型供給系をノズル回りにとりつけた。この供給系は TVC 用として初めての blowdown type で第 7 図にその系統図を示す。また同図に噴射のシーケンスを記入してある。

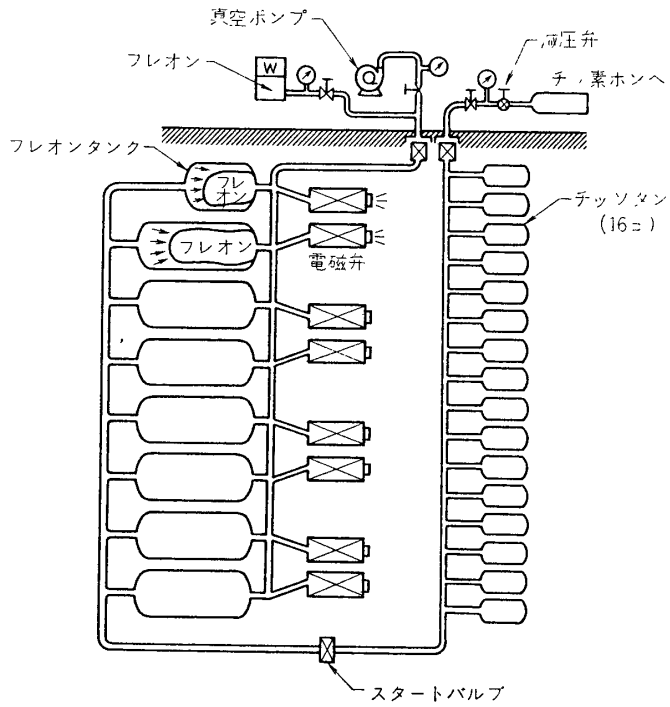
○計測項目 (TVC に関係した部分のみ)

主推力 2, 縦横推力 4, 内圧 3, 真空槽圧 2, TVC タンク圧 2, 噴射アンサ圧 4, 電磁弁マーク 4, ノズル壁静圧 4, 温度 6, 振動 3, 流量は測定できないので、タンク圧とフレオンの全消費量から、流量試験の結果を利用して算定した。

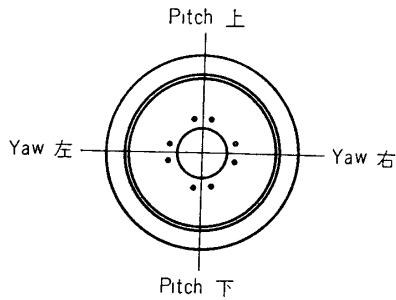
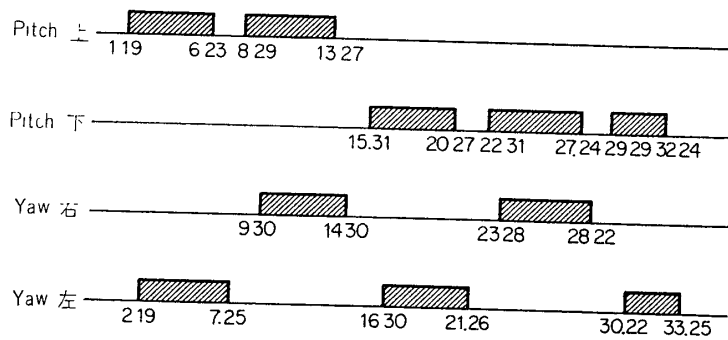
○おもな結果

第 8 図に主推力、内圧、真空圧、縦横推力およびタンク圧のデータを示す。燃焼中のタ

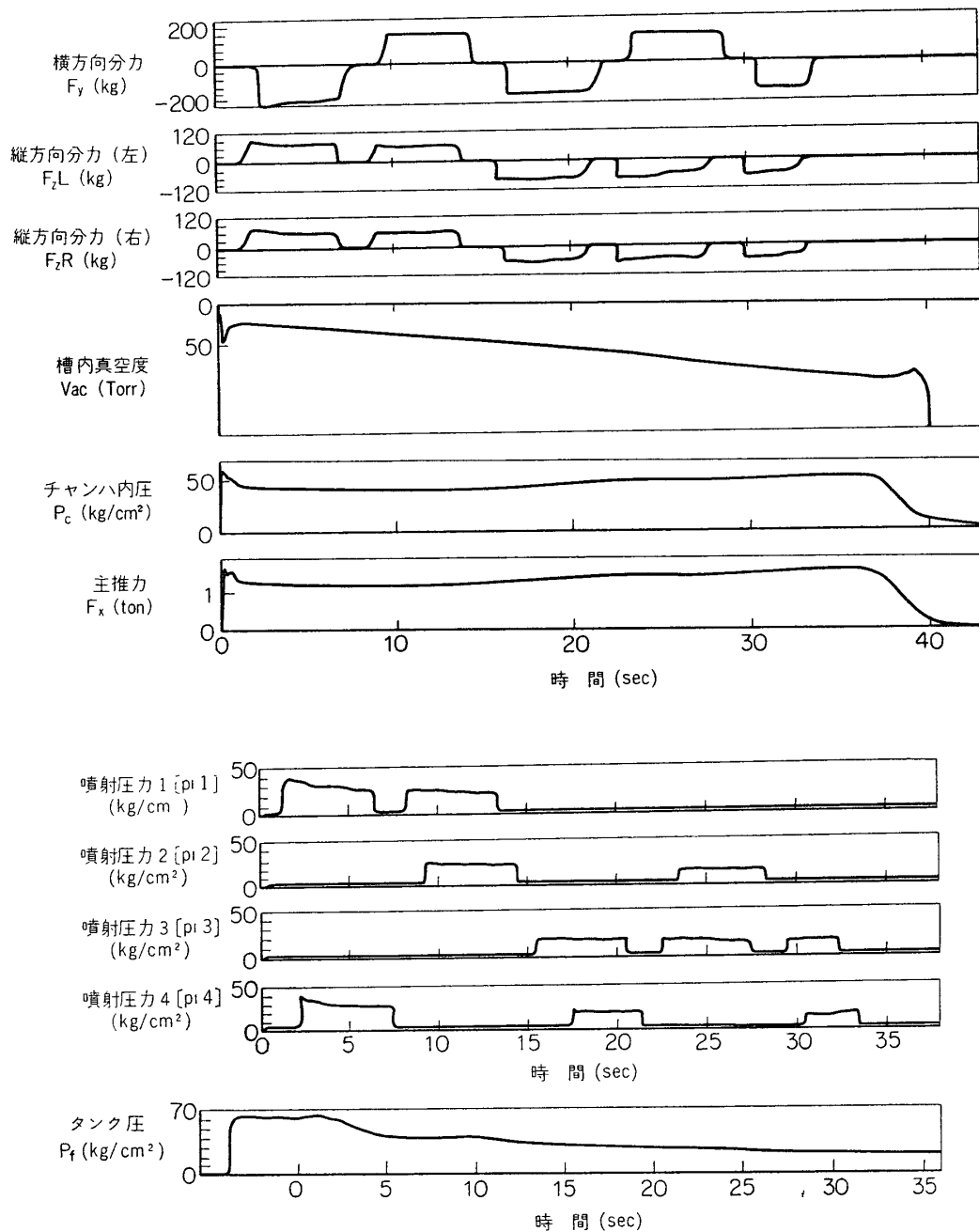
L-735 1/3 TVC 系統図



L-735 1/3 TVC 噴射タイムシーケンス



第7図 L-735 1/3 TVC 系統図

第 8 図 735¹/₃ TVC (45-7-1) 諸データ

ンク圧力は、フレオンの消費にともなって減少する。これより算定した流量比と横比推力の関係を第 9 図にプロットした。この場合、流量が減少するに伴い噴射圧力が低下するため横比推力の増大分を打消す傾向にある。押圧の時間変化はポリトロープ変化と考えられるが実験結果はほとんど $n=1$ すなわち等温変化に近い傾向となっている。第 10 図には、燃焼中 TVC 作動期間と休止期間とにおける振動のスペクトルを示した。これにより、TVC 作動中にはかなり高周波 (500~5,000 Hz) のノイズが発生する

ことがわかる。

全般的にいて、L-4SC の 2 段目 TVC の機能を確認することができたといえる。

vii) M-30 TVC (Freon 114 B₂) (45. 4.5 実験)

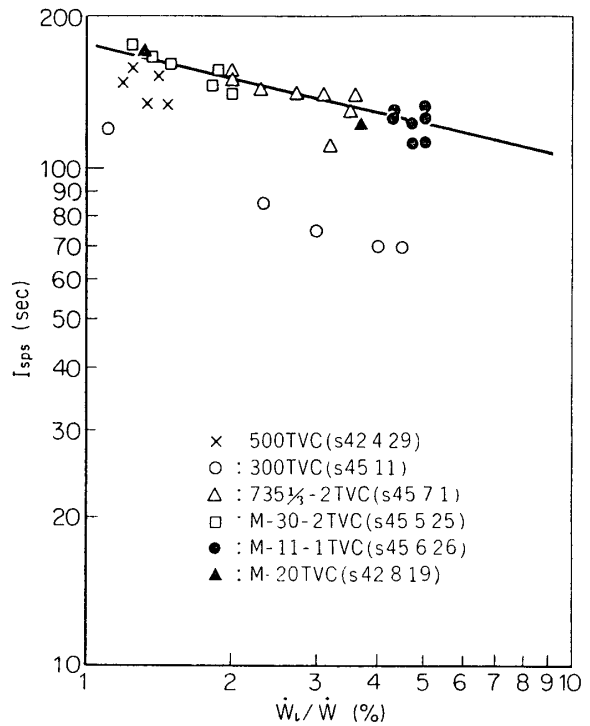
○目的: M-30 に TVC を取付けた場合の特性

○供給系およびシーケンス

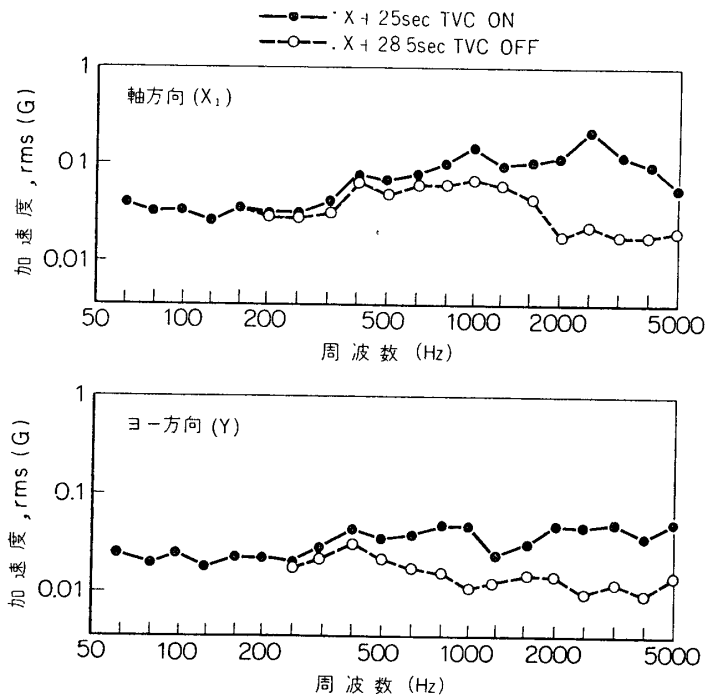
地上試験用の供給装置で、ノズル後方よりみて右側のみ 2 個の噴射。噴射圧は前半 50 kg/cm²、後半 30 kg/cm² とし、点火後 16 秒より 18.5 秒の間に切替えた。

噴射は前半 2~9 秒まで連続、11~秒まで 0.5 秒のパルス状噴射、後半は 22 秒より 28 秒まで連続、30~33.5 秒まで 0.5 秒のパルス状噴射

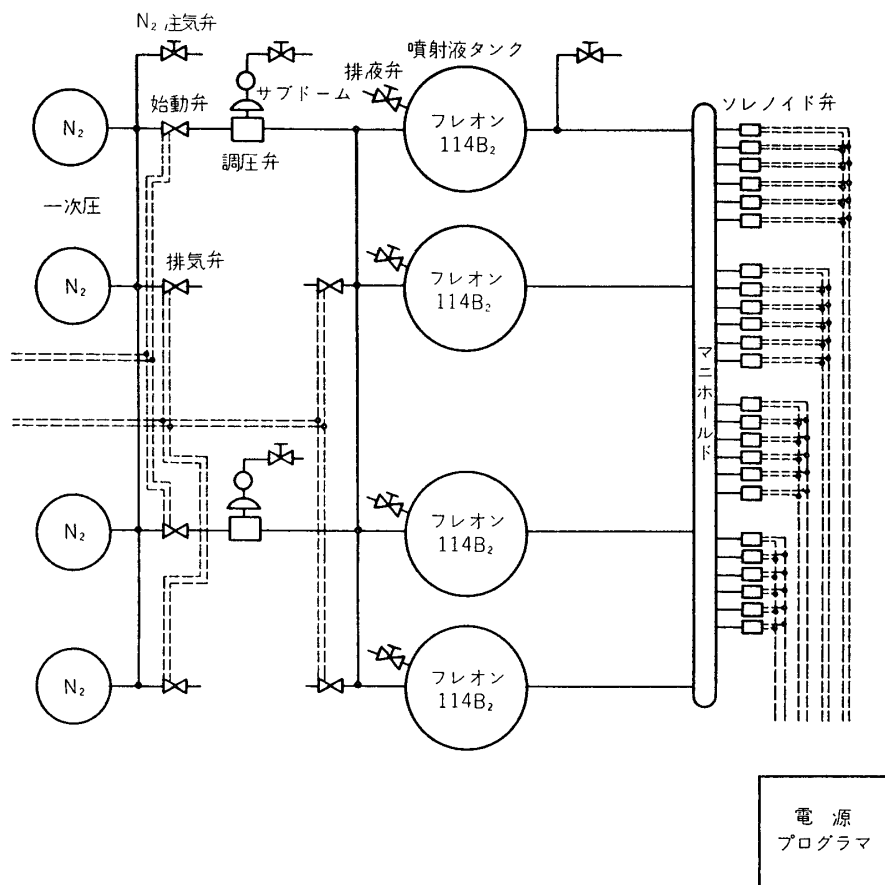
とした。ここにパルス噴射の duty は 50% となった。



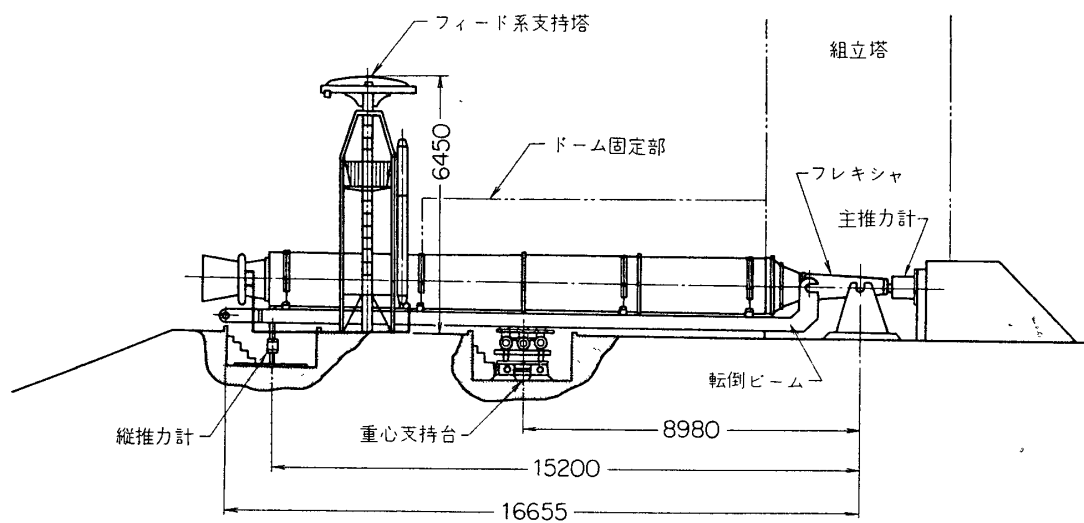
第 9 図 流量比と横比推力の関係 (フロン 114 B₂)



第 10 図 735¹/₃ TVC 振動スペクトル線図 (1/3 オクターブ・フィルター)



第 11 図 (A) M-11 TVC LITVC 概要系統図



第 11 図 (B) M-11 地上燃焼装置

○おもな結果

実験により得られた流量比と横比推力の関係を第 9 図にプロットした。

パルス噴射特性は、遮断周波数 2 Hz, 18 db/octave の low pass filter 特性がほとんど横推力の波形を決定しており、推力の応答特性は直接測定できないが、流量や噴射アンサ圧力よりすれば、10 msec オーダの立ち上り特性をもつと推定される。

viii) M-11 TVC (Freon 114 B₂) (45.6.26)

○目的：搭載型を考慮した TVC を M-11 型に取り付けた場合の諸特性の測定

○供給系および噴射シーケンス

M-11 は M-4 SS の第 1 段として使用する予定のモータであるので、横分力は主推力の 3% を目標に設計された。これに伴い噴射液の量は、最大に見積って 1.7 ton にもなるので、これをノズル回りに収納することは不可能で、細長い噴射液タンクは 1 段目モータ回りに抱かせることとなる。

この様な構造をもつ供給系を、水平位置で燃焼試験するエンジンに取り付けることでは、液面が飛しよう時と異なってしまうので具合が悪い。そこで、別に垂直に立てた 1 段目相当の搭をつくり、その回りに噴射液タンクを取付け、これよりノズル回りの噴射機構に可撓管で噴射液を供給することとした。

第 11 図には全体供給系の装置を示し、第 12 図写真にはノズル回りの TVC 機構を示す。噴射孔は 1 象限に 6 個である。

噴射シーケンスは、ノズル後方よりみて上側より右まわりに No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 象限とすると、

No.-1 6~9, 22~26

No.-2 10~13, 29~33, 37~41, 47~49

No.-3 14~17, 28~32

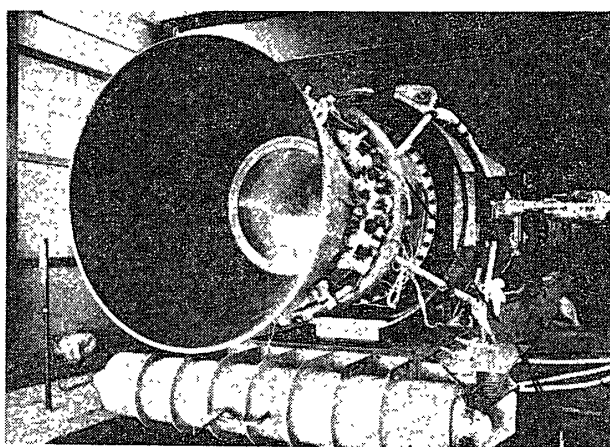
No.-4 2~5, 23~27, 35~37, 43~45

(数字は点火後秒時)

ととった。

○おもな実験結果

実験日当日になり、N₂ 1 次圧タンクの一つに漏れが生じ、また、加圧用のコンプレッサが不調となったため、応急処置として N₂ ボンベ 12 本を 1 次側に直結して実験に臨んだ。事後の検討で、今後のものについてはタンク設計上改良を加えることとした。その他の点に関してはほぼ問題がなかったが、これはこの実験に臨むまえに、TVC 噴射試験をかなり綿密に行



第 12 図 スタンド上の M-11 TVC モータ

ない、配管系、バルブ類について問題点を修正またはチェックしておいた結果であり、特に使用した ON-OFF 電磁弁（輸入品）は性能が不安定で、信頼性の点で将来とも十分自信をもって使用し得るものとはいいがたかった。

フィード系圧力曲線のうち、マニホールド圧力は約 50% もの過渡的変動をみせている。この場合実機に比べて配管が長いという不利な点はあるが、いずれにせよ、このようなサージ圧力は設計上留意せねばならないことである。

噴射による横比推力と流量比の関係は第 9 図のプロットに示した。

全体として、大型 TVC 装置動作特性の確認ならびに問題点の提起とオペレーションの習熟という意味から意義のある実験であったといえよう。

5. ループ試験

ループ試験とは、TVC 付きモータに実際の制御電気部を取り付け、これを 1 自由度（ヨー方向）について動作させ制御系全体としての特性を把握しようとするものである。このためのテストスタンドは電気部を含む TVC 装置付きモータが垂直軸回り水平面内を自由に回転できる構造となっている。（第 13 図 写真参照）

i) 420 ループ試験 (43. 4. 18 実験)

○目的：TVC 制御ループ特性の試験、特に K-10 C-2 の 2 段目に相似させた。

○装置および試験方法

1 自由度回転式テストスタンド（第 13 図写真）上に制御電気部をとりつけた 420¹/₃ TVC (H₂O₂) モータをとりつけた。

姿勢基準である 2 自由度ジャイロを 0° の方向（スタンドベース方位基準）にセットし、機体軸は点火前において +10° の方向に向けておき、点火後機体軸を 0° 方向に向ける制御をさせる。制御力としては LITVC 以外に H₂O₂ のヨー方向サイドジェットも動作するが、前者の制御トルク 160 kgm（予想）に対し、後者のそれは 8 kgm であって、TVC 作動期中の制御特性ではほとんど無視し得る大きさである。

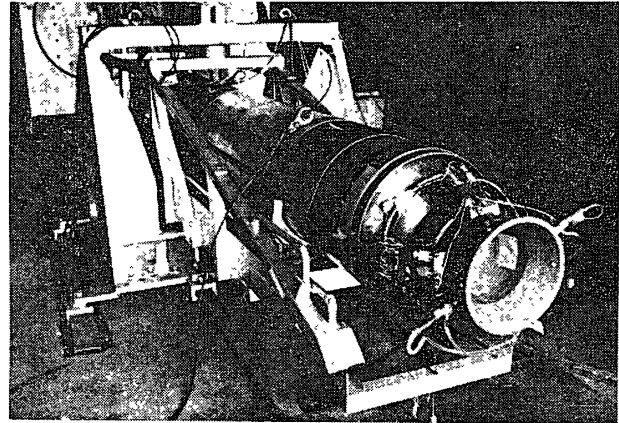
○実験結果

第 14 図に機体運動のヨー角の時間に対する変化を示す。これよりただちに判明した事実としては、以下の点があげられる。

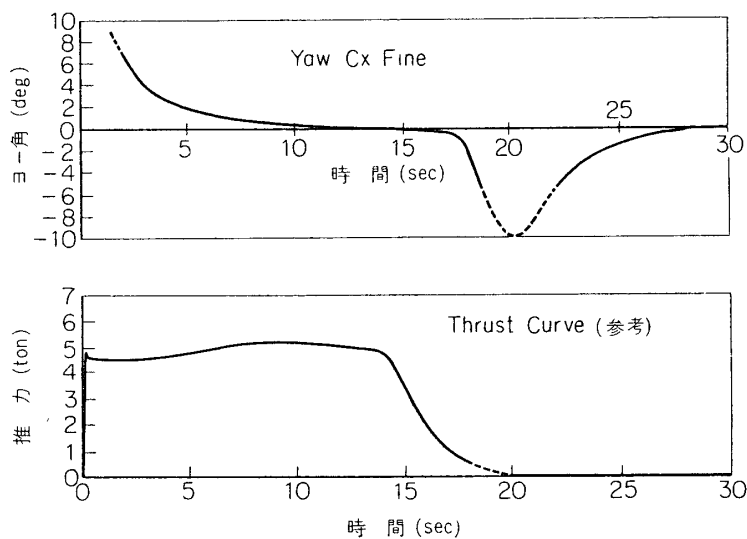
a) 初期角変位の修正は完全に行なわれたが、実用上少し時間がかかり過ぎるので、制御パラメータを吟味する必要がある。

b) 燃焼末期においてきわめて大きい外乱トルクが発生した。

実験後の検討により、次のようなことが推定された。



第 13 図 揺動スタンド上の 420 ループ試験モータ



第 14 図 420 TVC ループテスト結果

- a) TVC 制御トルクは定常時横推力の値からの推定値の 70~80% 程度となっていた。これは、整定時のリミットサイクルの振幅、周波数からの推定であったが、あとに、この周波数で電磁弁を ON-OFF をしたときの流量特性をとって見た結果、この程度の流量低下がみられ実験値が説明された。
- b) アナログ シミュレーションの結果、TVC の電磁弁に制御信号を印加してから横推力発生までの時間おくれは、50 msec の程度と推定された。
- c) 燃焼終了時の外乱トルクは、燃焼室内圧低下にともなうノズル内噴流の壁からの離れによる。しかもこの離れは TVC 噴射により、正常な場合と逆方向の力を発生させている。

この現象は燃焼末期に TVC を作動させるべきか否かという問題を提起するが、これについては後にふれることとする。

ii) 500 TVC (FRP) ループ試験 (Freon 114 B₂) (44. 4. 28 実験)

○目的: 420 ループ試験の際の問題点を改めたうえでの制御ループ特性の確認

○装置および方法

前回と同じ装置によった。今回は基準方位を点火時点 X で 0 とし、 $X+6$ 秒以後タイマプログラムにより基準方位を変化させ、それに伴う制御特性をみる予定であった。なお初期の機軸方位は -10° であった。

○結果

制御パラメタを整定までの収束時間を短くする様にとったため、初期角の修正に要した時間は約 1 秒、(基準方位に対する誤差 0.5 以下となるまでの時間) と 420 ループ試験の時に比し、大幅に収束時間を短縮できた。しかし、プログラムは、実験操作上のミスで作動させることができず以後はリミットサイクルの特性のみが計測された。また、この機体は FRP の試験データでもあったため、ノズル設計上の問題から、点火後約 23

秒でノズルの一部が破損したため燃焼末期の制御特性は計測できなかった。

6. 比例制御の実験

i) 300 TVC (Freon) (45.11.16 実験)

○目的: 電気-油圧比例制御弁を用いた TVC 特性の試験

○装置

モータは補助ブースタ用のもののノズル部分に比例弁取付のための多少の改造を施した。比例弁の概念図およびサーボ系のブロック線図を第 15 図に示す。

噴射孔は 1 個で円周上斜位置につけ、縦横方向ロードセルに力が加わる様にした。燃焼実験に先立ち電気油圧式サーボ系のチェックを兼ねて、流量特性試験を重ね、供給系の過渡特性試験がなされた。

○計測

TVC に関係した計測項目は次の通りであった。

主推力 2, 縦・横推力 6, 内圧 2, 供給圧 1, マニホールド圧 1, 油圧 1, 噴射コマンド圧 1, バルブ開度, 噴射流量

○噴射プログラム

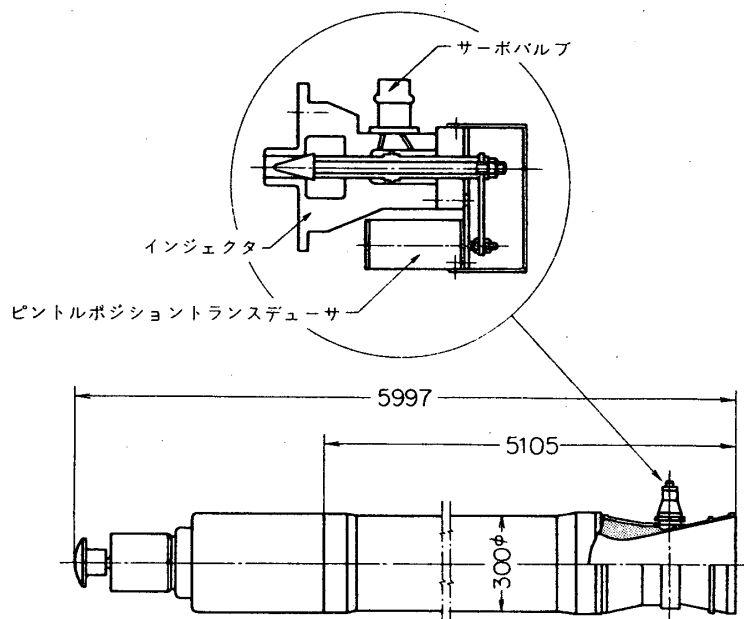
点火時を X とし, 噴射コマンドとしては

$X+0.5\sim 2.0$ 最大流量 (一定)

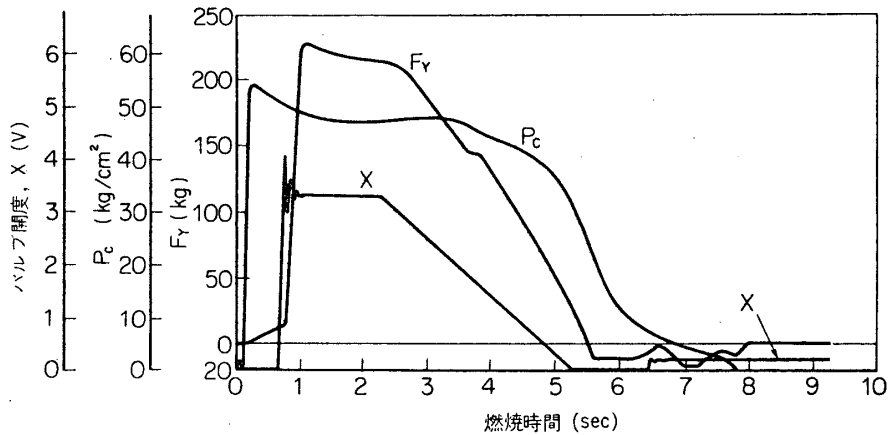
$2.0\sim 5.0$ 最大より 0 まで直線変化

$5.0\sim 6.0$ 0

なお, $X+6.0$ 以後は弁の過熱防止のため微量の噴射液を噴出させた。



第 15 図 300 TVC-1 (1970-11-16) 比例弁説明図



第 16 図 300 TVC-1 (1970-11-16) 実験結果

○実験結果

第 16 図には時間とコマンド電圧，バルブ開度，流量および発生した横分力の関係を示す。これにみる様に供給管が長い為多少横分力の追従性が良くないが，比例制御弁による TVC 特性の概要を把握できた。これにより横方向比推力が広範囲にわたる流量比に対し得られた(第 9 図)が，その値は噴射孔位置が最適でなかったことなどで低目の値が得られた。

ii) 300 TVC (Sr(ClO₄)₂ 水溶液) (46. 11. 28)

○目的：比例弁（電気-油圧式）による真空中の TVC 試験および噴射液としての Sr(ClO₄)₂ 水溶液の性能試験。

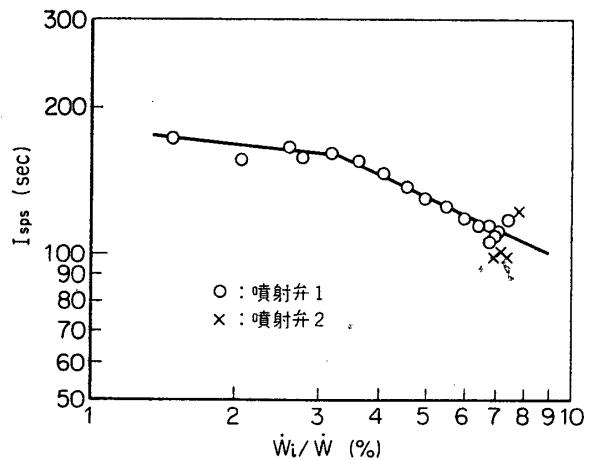
○装置

比例弁は若干特性の異なったものを 2 個それぞれ噴射孔位置を

$$\epsilon_i/\epsilon_e = 4.2/14, \quad \epsilon_i/\epsilon_e = 5.6/14$$

と軸方向にずらして円周上対向位置に取付けた。

上流側を弁 1，下流側を弁 2 とするとシーケンスは点火時 X より X+2 秒まで弁 2 を全開，X+1~X+1.4 までは両方の弁を完全に閉じ，X+1.4~2.7 まで弁 1 を全開後，X+7 まで時間に関し直線的に弁を閉じた。使用した Sr(ClO₄)₂ 溶液は温度低下による結晶の析出に配慮し，63%（密度 1.85 g/cm³）として使用した。比例弁を駆動するためのサーボアンプおよび電池は環境試験



第 17 図 流量比と横比推力の関係 (63% Sr(ClO₄)₂)

を兼ねて、ノズル回りに取付けて実験した。

○実験結果

比例弁の動作は全く正常で、第 17 図に示すような $\text{Sr}(\text{ClO}_4)_2$ 水溶液の噴射液としての特性が得られた。噴射位置による横比推力の相違は顕著ではないが、弁 1 の位置の方が多少性能がよい様である。いずれにせよ、 $\text{Sr}(\text{ClO}_4)_2$ 水溶液は Freon 114 B₂ と大差ない性能で、価格の点を考慮すれば現状において余り利点がない様に思われる。

7. 総括および今後の問題点

前節に概要を記した様な各種試験を経た段階で以下の点に関しては、量、質ともかなりデータを得るに至ったと考えられる。

1. フレオン 114 B₂ および 90% H₂O₂ の噴射液としての特性、特に横方向比推力と流量比の関係
2. 噴射位置、噴射押圧の影響
3. 真空条件下の LITVC 特性
4. 中型の搭載型供給系、特に blowdown システムの動作特性および動作中の環境

1. については、すべての結果を第 2 図、第 9 図にプロットしてみた。これらの点はすべていろいろな条件下での実験によるものであるから、縦軸である横方向比推力には 3. 節で述べた様な因子がある程度影響している。

この関係は $I_{sps} \propto (w_i/w)^{-\nu}$ で、近似的にあらわされる様である。すなわち、

$$90\% \text{ H}_2\text{O}_2 \text{ について } \nu=0.33$$

$$\text{Freon 114 B}_2 \text{ では } \nu=0.23$$

$\text{Sr}(\text{ClO}_4)_2$ 水溶液については経験が少ないが、第 17 図の実験結果からは、

$$\nu=0.10 \text{ (} w_i/w < 3\% \text{)} \quad \nu=0.44 \text{ (} w_i/w > 3\% \text{)}$$

となる。

もち論、これは流量比のある範囲についてあてはまる表現であろうけれども、実用の範囲を cover するには十分であり、また、理論的にも多少の根拠があると思われる。

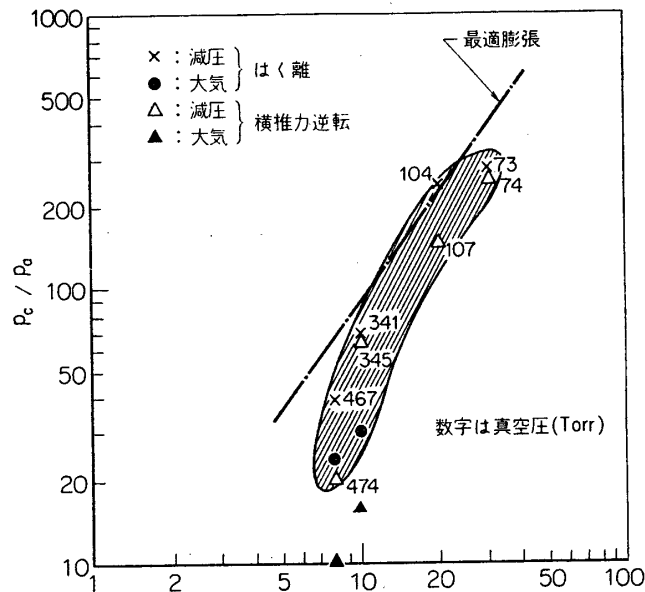
Freon 114 B₂ のプロットについていえば w_i/w 以外の噴射条件が、 w_i/w が大きい方では I_{sps} は大きくなる様な傾向があるので、 ν はもう少し大きくなるべきかも知れない。

3. の真空条件下での TVC 特性として問題となるのは、燃焼末期における制御性の現象である。

大型ロケットでは真空燃焼試験装置の構造原理上現在のところ、この付近の状態を真空の状態に相似させることができないが、日産自動車において、大型の密閉真空槽中で TVC 付きの小型モータを燃焼試験することによって得られた結果によれば、高空において十分な真空中で燃焼する場合はこの様な不都合は生じないと思われる。すなわち、いくつかの開口比の異なるモータを用意し、真空槽圧を変えた状態で燃焼中連続的に TVC 噴射を行なう。このモータの燃焼特性は尻下りであるので、点火時より燃焼終了時と相似になっている。

ある条件になると、横推力がはく離により不整となり、遂に逆転することとなる。

第 18 図は、横軸にノズル開口比、縦軸に圧力比をとって実験結果をプロットしてみたも



第 18 図 LITVC によるはく離領域

ので、図中数字は真空圧 (Torr) を示す。この様なはく離や推力逆転はすべての場合にみられるわけではなく、いかに p_c/p_a が下っても、噴射流の噴射量が少ない場合 (たとえば流量比 1~2%) には、まったく最後まで正常な横推力となる。また横推力が異常となる圧力比は、真空度がよくなるほど大きくなる傾向がある。しかし、この様な異常が最適膨張の圧力比を上回る条件で発生することは、実用上ないといってもよいと思われる。

さて、TVC 開発上の今後の問題点を整理すれば、次の様な事柄が挙げられよう。

7.1 TVC 性能上の問題

i) 高性能噴射液の探究

中、下段用のものはシステム重量の点でほぼ現状のものでも満足し得るが、上段用では横比推力が大きいものを採用すべきである。

ii) LITVC 以外の方法による軽量化

首ふりノズルシステムの性能評価や SITVC でもたとえば粉末 TVC の実用性検討など。

iii) LITVC 理論の確立、および実験的確認

7.2 供給系に関する問題

i) 電磁弁類の信頼性向上

ii) 比例弁の型式選定

現状では電気~油圧式、電気~機械 (モータ) 式のいずれを採用するかに絞られている。

近く比較実験を試みる予定である。

iii) プラダ液などの押し出しに関し、軽量で信頼性のある方法の開発

iv) 系内における過渡的圧力上昇の防止、抑制

v) モジュール化、規格化

vi) 大型タンクのスロッシング効果の評価

vii) 支援システム (打上げ時作業用, 点検作業用) の完備

7.3 制御系特性に関して

i) 時間遅れ発生機構の解明と測定法

ii) 比例弁の非線型特性の補償法

iii) 比例弁を使用した際のループ特性

iv) 外乱に対する制御力の発生法

すなわち, 外乱の発生した円周位置のみ選んで修正制御力を発生させる方法の確立

v) 所要噴射量の算定法

vi) 燃焼終了までに噴射液を使い切る技術に関する検討

ほとんど項目のみ列挙してみたが, これらが当面, われわれが取り組まねばならない問題であろう。

8. 結 び

LITVC に関し計画している当面最も大型の飛しょう計画は, M-3C であり, 宇宙研における今までの試験結果を盛り込んだ設計が現在進められている。ここに記述した TVC の地上燃焼試験は, 主として予算の制約から決して数, 質において十分なものではないが, TVC 関係者としては, 残された問題の相当部分が, 実際の飛しょう実験によって解明され, 確認される性質のものであるので, 今後地上試験とともにより多くの飛しょう実験が行なわれる様, 強く希望している。

最後に, ここに記述した実験は, 特に断わらない限りすべて宇宙研推進研究班が企画し宇宙研が実施したもので, 実施に際しては, 担当実験主任以下, 所内所外の多数の実験班員が参加して行なわれたものであることを付記しておく。

1972年6月10日 新設部(工学)

参 考 資 料

- [1] Thrust Vector Control (TVC) System Study Program Vol. 1 Final Report Summary NASA-CR 72727
- [2] 420¹/₃ V 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 42 年
- [3] 420×1,000 V 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 42 年
- [4] M-20 TVC 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-67-002-P, 昭和 42 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 航研一報-42-29)
- [5] 420¹/₃ V (H₂O₂) 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 42 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 航研一報-42-41)
- [6] 500 TVC-1 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-68-001-P, 昭和 43 年
- [7] 420 TVC ループ実験報告, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 43 年
- [8] L-735¹/₃ TVC-1 地上燃焼実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 43 年
- [9] 500 TVC (FRP) ループ実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, 昭和 44 年 (日

- 産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-44-2)
- [10] M-30-2 TVC 地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-70-010-SY, 昭和 45 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-45-7)
- [11] M-11-1 TVC 地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-70-024-SY, 昭和 45 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-45-11)
- [12] 300 TVC 比例地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-70-028-SY, 昭和 45 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-45-16)
- [13] L-735¹/₃ TVC-2 地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-70-025-SY, 昭和 45 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-45-13)
- [14] 300 (SB) TVC 地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班
- [15] 300 (SB) TVC 地上燃烧実験報告書, 東京大学宇宙航空研究所, SES 研究班, SES TN-72-008-SY, 昭和 47 年 (日産自動車株式会社, 報告書, 621-Y-46-19)