

M-3S型ロケットの機体計測

今澤茂夫・斎藤敏
中田篤・富澤利夫

(1986年1月18日受理)

1. はしがき

M-3S型シリーズの機体計測は基本的には先のM-3C, M-3H型シリーズと同一であるが、第1段に制御装置を備えたことにより制御系の性能および機能を計測する項目が追加された。

また第3段モータの性能は衛星の制約から従来、性能試験を目的とした1号機の試験衛星に計測器を搭載して行ってきたが、M-3S型ではプレセッションを計測するために常時搭載される横加速度計(YSA)を改修することで副次的に推進軸方向の加速度も得られるようになった。

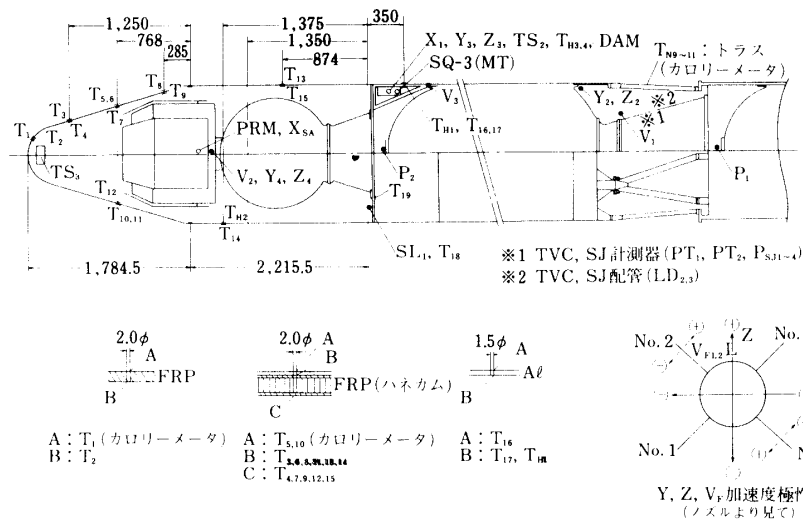
本稿はこれらの計測結果の概要について述べる。比較の便宜を図るために先のM-3C特集号[1], M-3H特集号[2]の体裁に準じてまとめた。

2. 計測器の概要

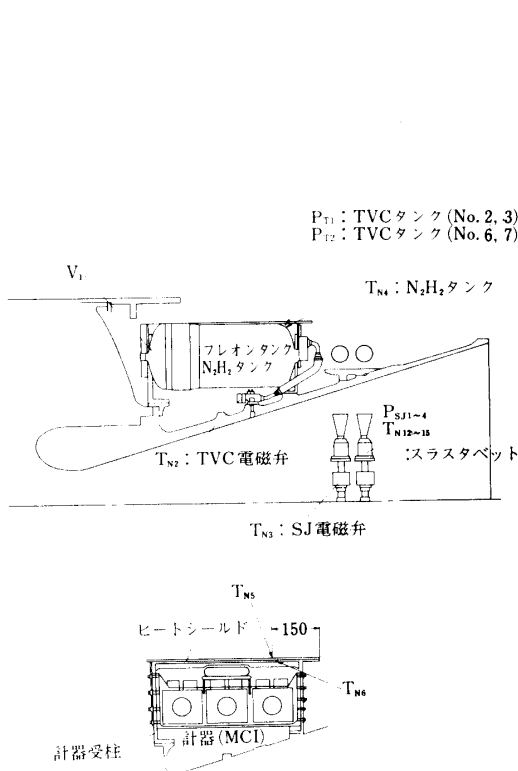
搭載された計測器は下記のものであるが、搭載位置および伝送系により第1表に示すブ

第1表 計測器の構成

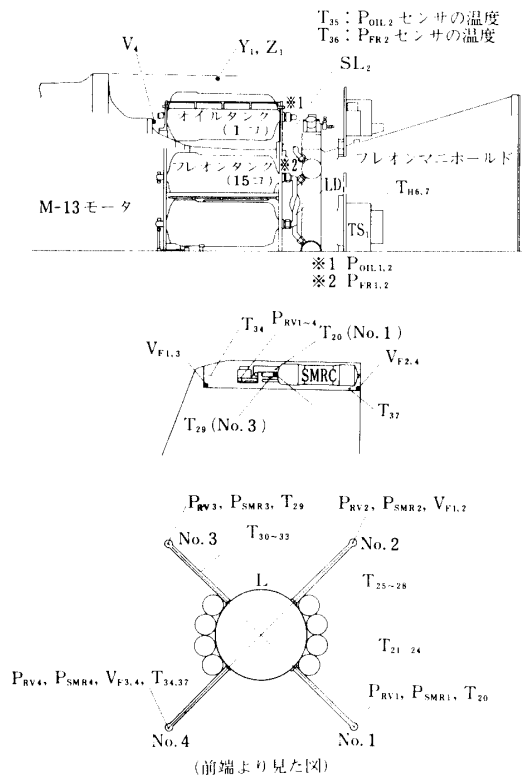
装置名	搭載位置	計測項目	伝送系	備考
NF計測装置	ノーズフェアリング	TS ₃	TM-2	
第2段計測装置1	第2段計器部	X ₁ , Y _{2,3} , Z _{2,3} , P _{1,2} , TS ₂ , SQ _{1,3}	TM-1 TM-2	2~4号機 Y ₄ , Z ₄ を搭載
第2段計測装置2	第2段計器部	V _{1~4} , SL _{1,2}	TM-3	
第2段制御系計測装置	第2段ノズル部	PT ₁ , PT ₂ , LD _{2,3}	TM-2	3,4号機 P _{SJ1~4} を搭載
第1段制御系計測装置	第1段ノズル部	Y ₁ , Z ₁ , V _{F1~4} , P _{FR1,2} P _{OIL1,2} , P _{RV1~4} , TS ₁ , LD ₁	TM-4	3,4号機 P _{SMR1~4} を搭載
衛星計測装置	衛星	X ₂ , Y _{SA} , P ₃ , DAM	TM _{SA}	2号機よりDAMは第2段計器部へP ₃ は1号機のみ



第1図 計測器搭載位置(1)



第2図 計測器搭載位置(2)



第3図 計測器搭載位置(2)

ロックにまとめられている。搭載位置、検出器の取付位置を第1~3図に4号機を例にして示す。

- | | |
|-----------------|--|
| ○縦方向加速度計 (X) | ○尾翼振動計 (VF) |
| ○横方向加速度計 (Y, Z) | ○制御系計測器 (PT) |
| ○デジタル加速度計 (DAM) | ○TVC圧力計 (P _{FR} , P _{OIL}) |
| ○モータ燃焼内圧計 (P) | ○SMRC圧力計 (P _{RV} , P _{SMR}) |
| ○温度計 (TS) | ○SJ燃焼内圧計 (P _{SJ}) |
| ○振動計 (V) | ○漏れ検出器 (LD) |
| ○音圧計 (SL) | ○作動確認計 (SQ) |

①制御系計測器は第2段ノズル部のTVC, SJのタンク圧, 温度を計測する。

②第1, 2表の略号に付した添字は搭載位置, 点数を表す。

計測器の性能は4機とも, ほとんど同一である。第2-1~2-3表に主要性能を1号機の例で示す。

3. 計測結果の概要

(1) 加速度・内圧

1号機は加速度計, 内圧計を衛星にも搭載して第3段までの加速度およびモータ内圧を計測した。3, 4号機では衛星に搭載する横加速度計(YSA)の測定方式を変更し, プレセッション検出器(PRM)とした。この方式は構造上加速度検出器が機軸方向に受感方向を持つので縦方向加速度計として利用できる。

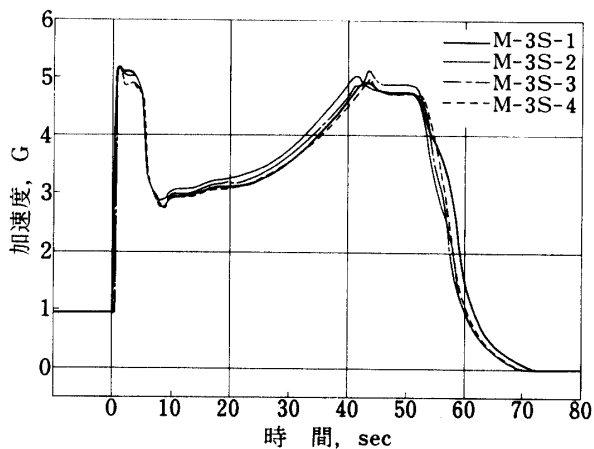
第4~6図は加速度の計測結果を各号機対比して示す。加速度の大きさ, 燃焼秒時とも大略一致している。

第2-1表 衛 星

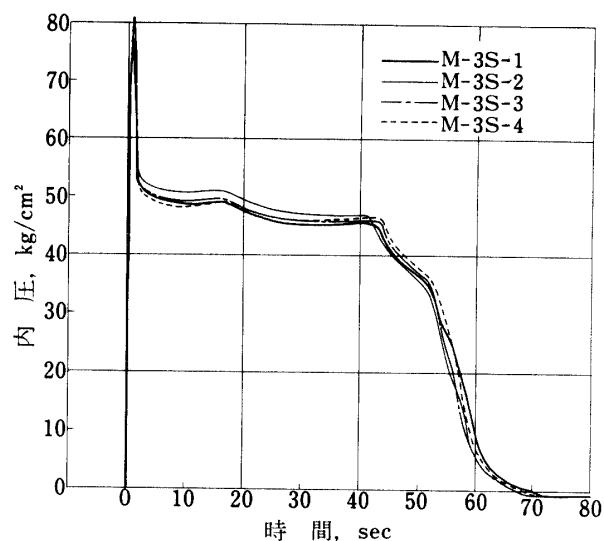
計測器	検出素子	測定範囲	感 度	テレメータ	測定位置
X ₂	サ ー ボ 型	-5~+25G	0.167 V/G	FM 15CH TM _{SA} PCM _{W48, W112}	衛 星
YSA	ストレンゲージ型	-5~+10G	0.2 V/G	TM _{SA} PCM _{W49, W113}	衛 星
P ₃	ストレンゲージ型	0~70kg/cm ²	0.07 V/kg/cm ²	FM 14CH TM _{SA} PCM _{W35, W99}	第3段モータ
DAM	サ ー ボ 型	-1~+1G	1.22 mG/bit	TM _{SA} PCM _{W32, 38 W72, 73 W114, 115}	衛 星

第2-2表 第2段

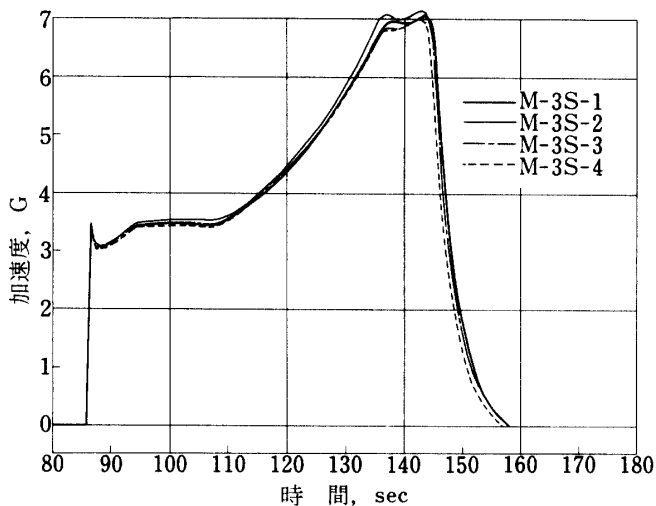
計測器	検出素子	測定範囲	感度	テレメータ	測定位置
X ₁	ストレンゲージ型	-5~+10G	0.33 V/G	TM-1 14CH TM-2 2A37	第2段計器部
Y _{2,3} , Z _{2,3}	ストレンゲージ型	±2.5 G	1.0 V/G	TM-1 10~ 13CH	第2段計器部 第2段ノズル部
P _{1,2}	ストレンゲージ型	P ₁ 0~80Kg/cm ² P ₂ 0~70Kg/cm ²	0.06 V/Kg/cm ² 0.07 V/Kg/cm ²	TM-1 15CH TM-2 2A17	第1,2段モータ
TS ₂	T _{16~19}	アルメルクロメル	0~250°C	TM-1 9CH	第2段計器部
	T _{11~4}	サーミスタ	-10~100°C		第2段計器部
	SQ 1	コネクタ, マイクロスイッチ, ピンジャック	シーケンス 5項目		各段, ノーズフェヤリング, スピンモータ
	E _{1~4}	抵抗分圧	+28V, ±18V, +9V		集中電源
TS ₃	T _{1,5}	アルメルクロメル	0~1094 °C	TM-2 2A25	ノーズフェヤリング各部
	T _{1~4, T_{6~9}} T _{11~15}		0~298 °C		
	T ₁₀		0~584 °C		
PT ₁	ストレンゲージ型	0~80 Kg/cm ²	0.06V/Kg/cm ²	TM-2 NA22	TVC タンク
PT ₂	σ	ストレンゲージ型	0~80 Kg/cm ²	TM-2 NA23	TVC タンク
	CNP ₁	ストレンゲージ型	0~130 Kg/cm ²		SJ タンク
	CNP ₂	ストレンゲージ型	0~17 Kg/cm ²		モジュール
	T _{N1~7}	アルメルクロメル	0~200 °C		第2段ノズル各部
V	V ₁	チタン酸バリウム	±10G	TM-3 1~ 4 CH	第2段ノズル部
	V _{2,4}		±20G		ノーズフェヤリング 第1段ノズル部
	V ₃		±5G		第2段計器部
SL _{1,2}	コンデンサーマイク	SL ₁ : 90~150dB SL ₂ : 100~160dB	0 dBmFS	TM-3 5, 6 CH	第2段計器部 第1段ノズル部
LD _{2,3}	圧電型	-70 dBm	---	TM-2 NA26 NA27	TVC, SJ 配管
SQ-3	パルストランス	点火系全項目(電流)	4 V パルス	TM-1 8 CH	タイマ



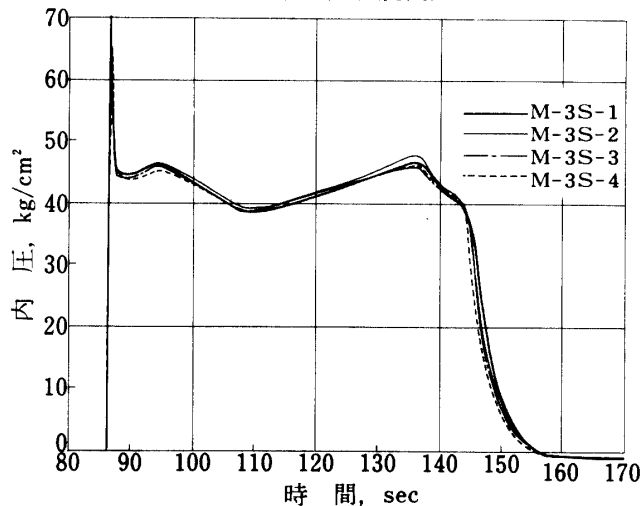
第4図 第1段加速度



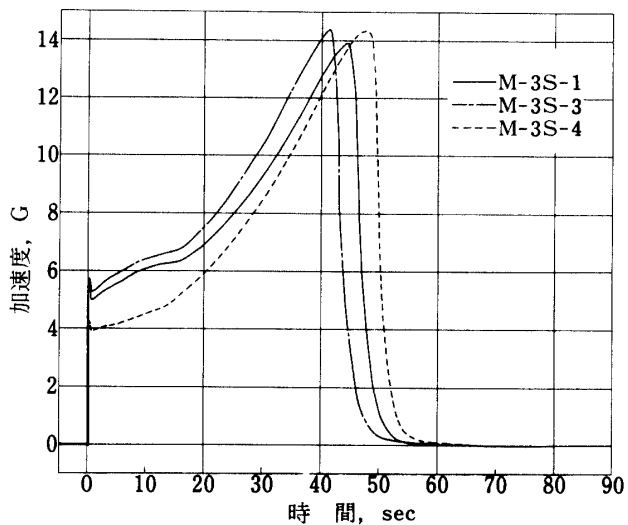
第7図 第1段燃烧内圧



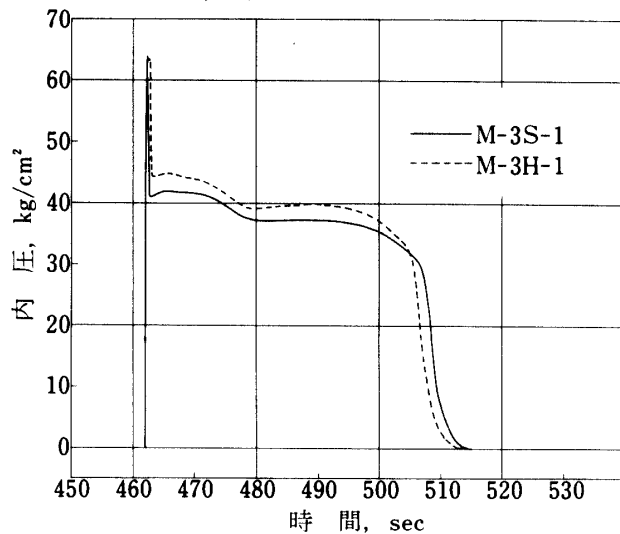
第5図 第2段加速度



第8図 第2段燃烧内圧



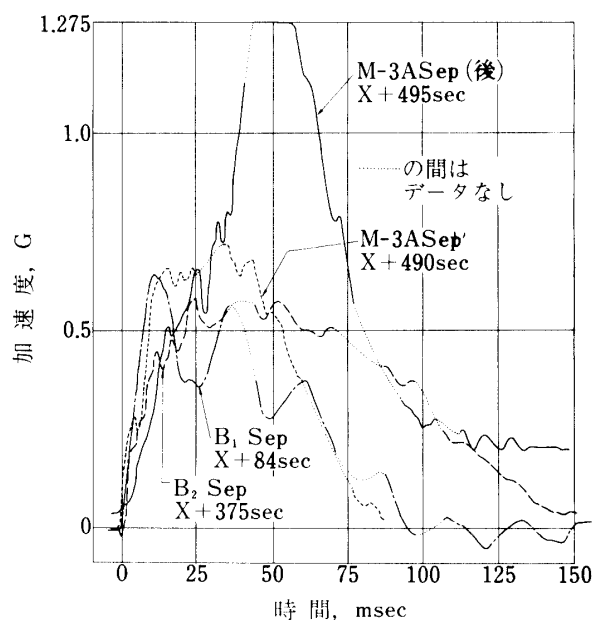
第6図 第3段加速度



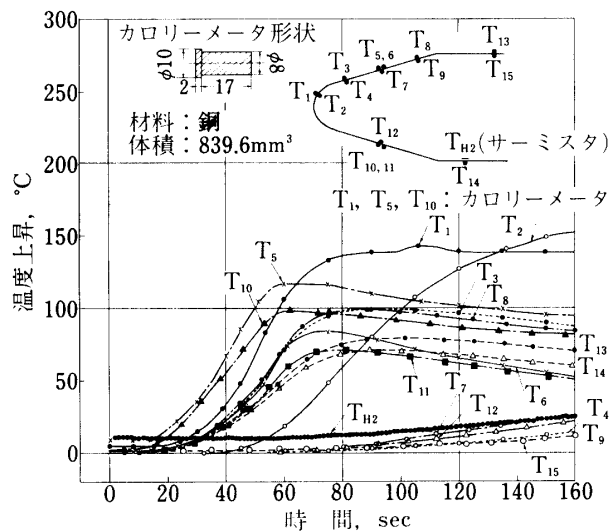
第9図 第3段燃烧内圧

第2-3表 第1段

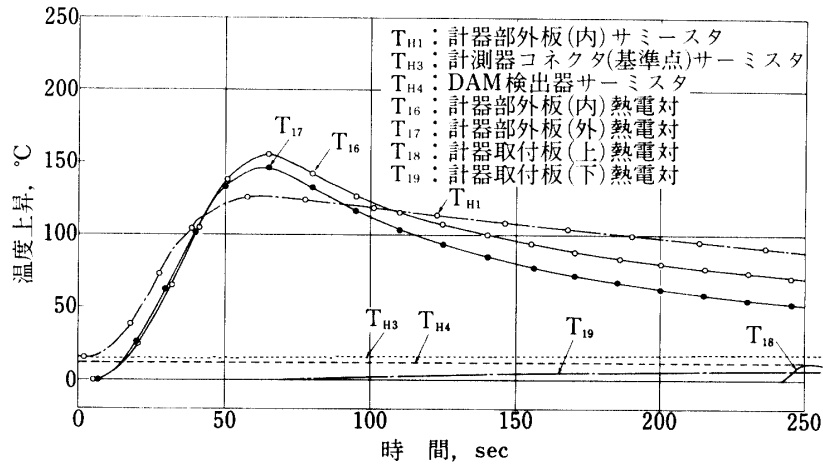
計測器	格出素子	測定範囲	感度	テレメータ	測定位置
Y_1, Z_1	ストレンゲージ型	$\pm 2.5G$	1.0 V/G	TM-4 10, 11CH	第1段ノズル部
V_{F1-4}	ストレンゲージ型	$\pm 15G$	0.17 V/G	TM-4 12~15CH	SMRC 2, 4
$P_{FR1, 2}$	ストレンゲージ型	0~80 Kg/cm ²	0.06V/Kg/cm ²	TM-4 7,8CH	フロンタンク フロンマニホールド
$P_{OIL1, 2}$	ストレンゲージ型	0~80 Kg/cm ²	0.06V/Kg/cm ²	TM-4 5, 6CH	オイルタンク オイルマニホールド
P_{RV1-4}	ストレンゲージ型	0~80 Kg/cm ²	0.06V/Kg/cm ²	TM-4 PCM	SMRC モータバルブ
TS ₁	T _{20~33}	アルメルクロメル	0~394 °C	TM-4 PCM	尾翼, SMRC各部
	T _{H5}	サーミスタ	-10~100 °C		
LD ₁	圧電型	-70 dBm	---	TM-4 9CH	TVC配管



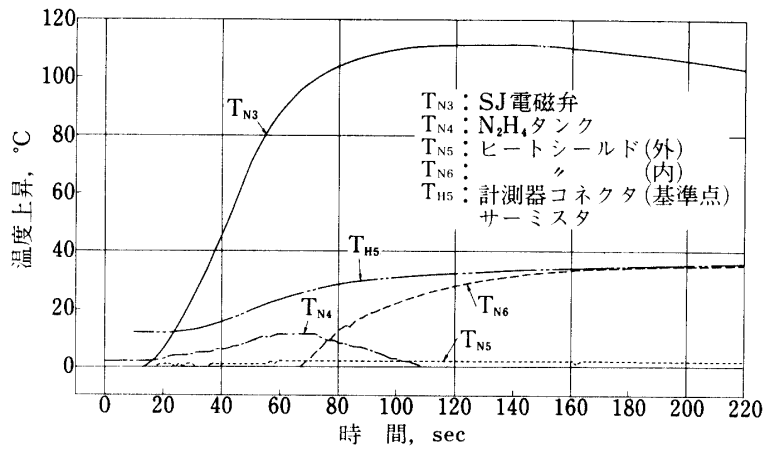
第10図 各段切離し時の衝撃 (M-3 S-4)



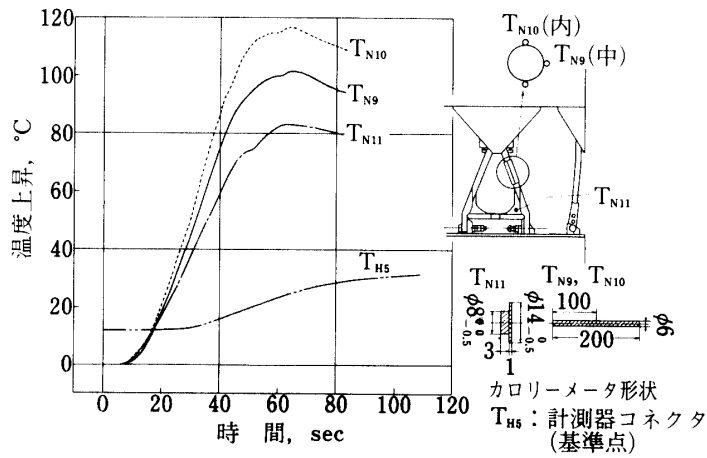
第11図 ノーズフェヤリングの温度 (M-3 S-4)



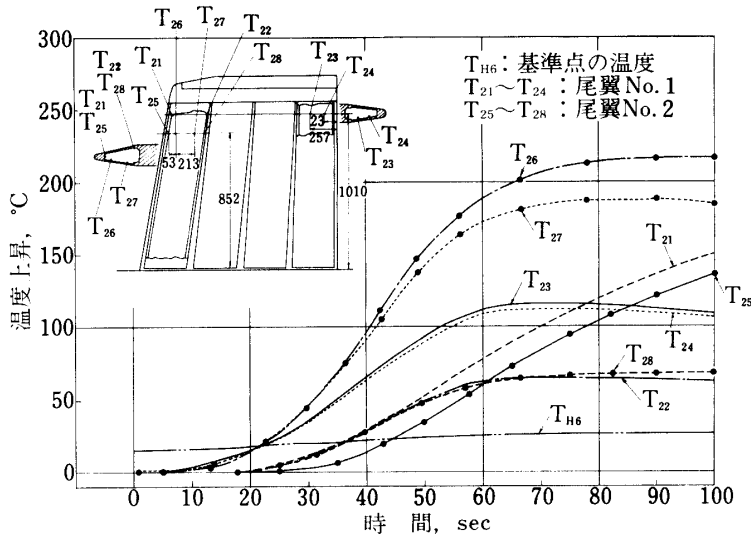
第12図 第2段計器部の温度上昇 (M-3 S-4)



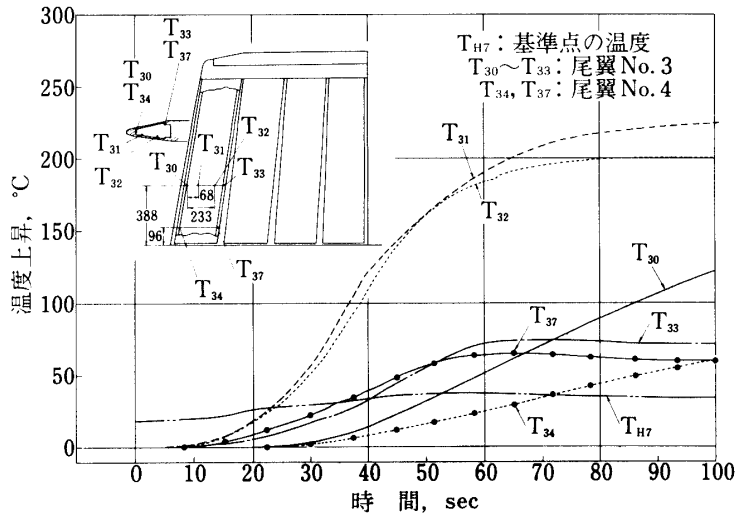
第13図 第2段ノズル近傍の温度上昇 (M-3 S-4)



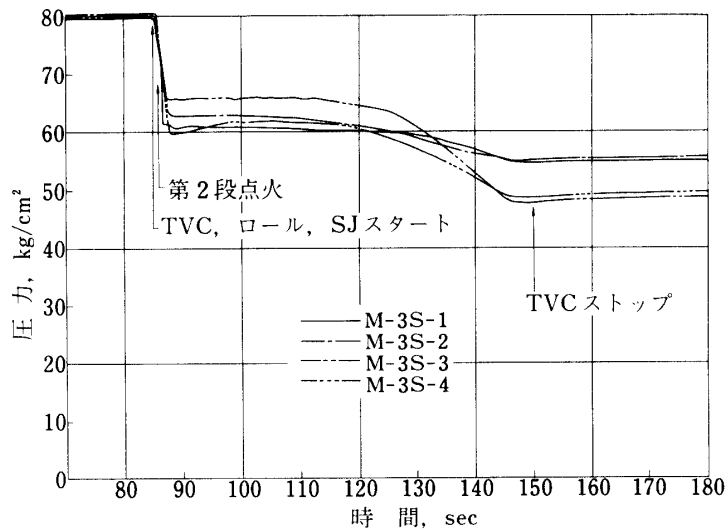
第14図 第1, 2段接手の温度上昇 (M-3 S-4)



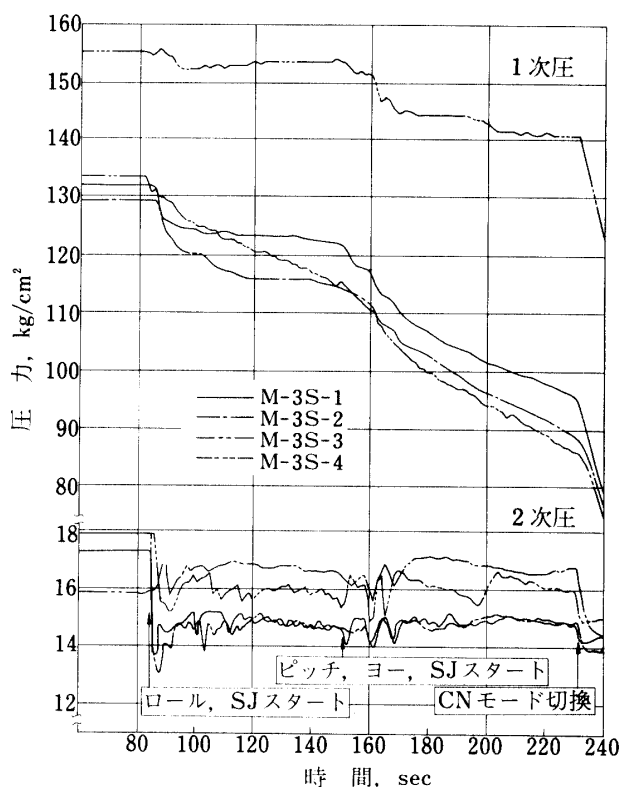
第15図 第1段尾翼 (No. 1, 2) の温度上昇 (M-3S-4)



第16図 第1段尾翼 (No. 3, 4) の温度上昇 (M-3S-4)



第17図 第2段 TVC 系タンク圧の変化



第18図 SJ系1, 2次圧の変化

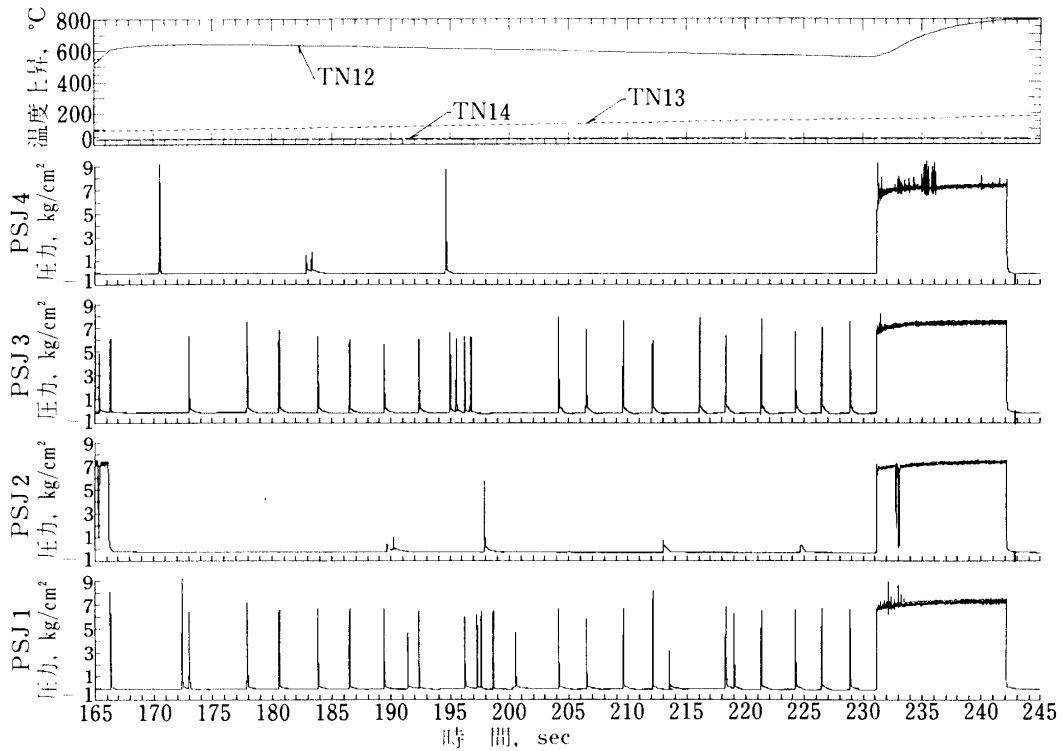
4号機の第3段はM-3A改として3号機までのM-3Aを性能向上したものであるが、第6図の1, 3号機と比較して緩燃焼の傾向を示している。第10図は4号機の各段切離しの衝撃を同じ加速度計で計測したものである。伝送系の性質上データの一部に欠落があるが、分離時の加速度が明瞭である。図中X+495秒の衝撃は異常で、ほかのデータとの照合から第3段モータが残留推力により、衛星本体に接触したものと推定されている。

第7~9図は各段の燃焼内圧の計測結果である。第3段は2号機が欠落しているが、傾向は加速度に良く対応している。

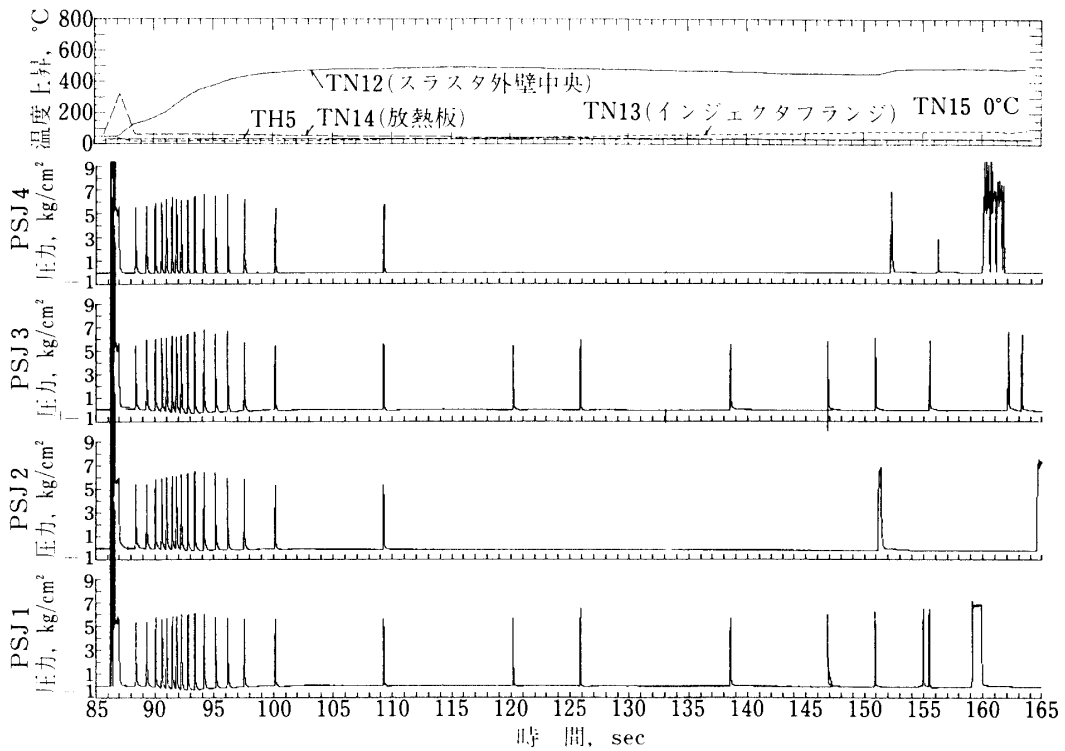
(2) 温度

M-3S型の温度計測は第1段に制御装置を備えたことに対応し、M-3H型と同一地点30点のほか尾翼部15点を追加した。また2号機から1~2段接手の計測を追加し49点となっている。計測点は機体により若干の変更があった。

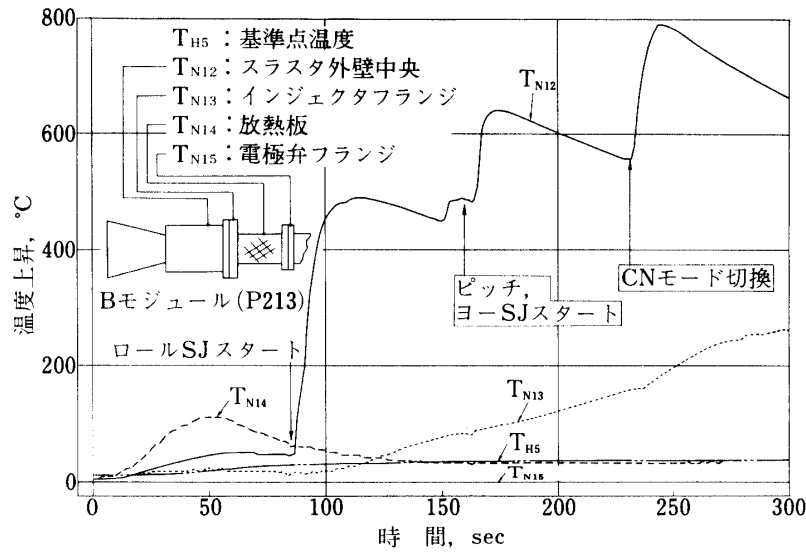
計測結果を4号機の例で第11~16図に示す。機体により温度上昇に多少の差異があるが、傾向はすべて同一で特記すべきことはない。



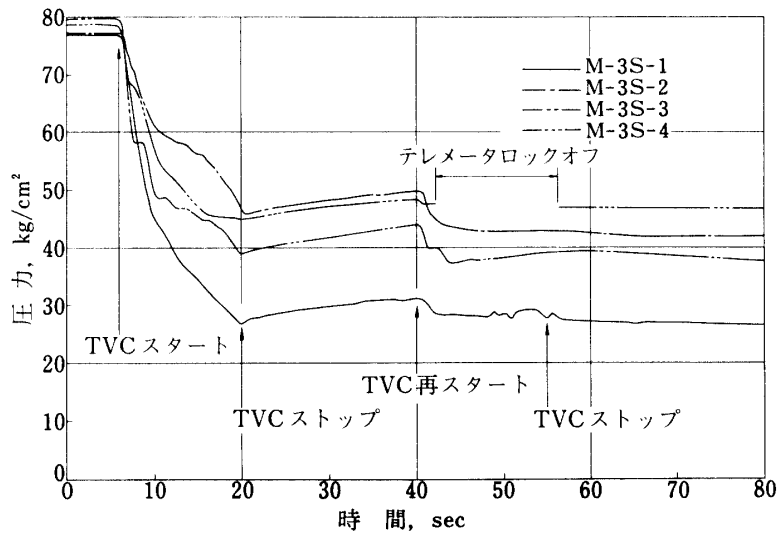
第19図 SJエンジンの燃焼圧および温度-1 (M-3S-4)



第20図 SJエンジンの燃焼圧および温度-2 (M-3S-4)



第21図 SJエンジンの温度上昇 (M-3S-4)

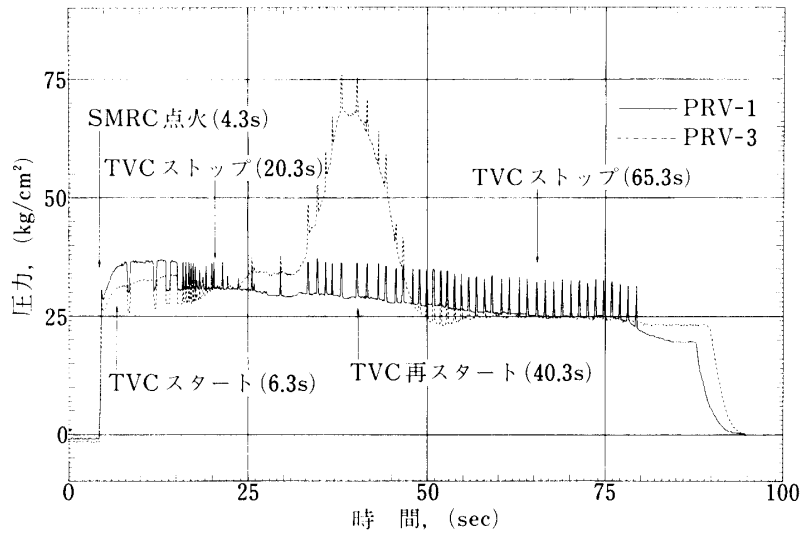


第22図 第1段 TVC系タンク圧の変化

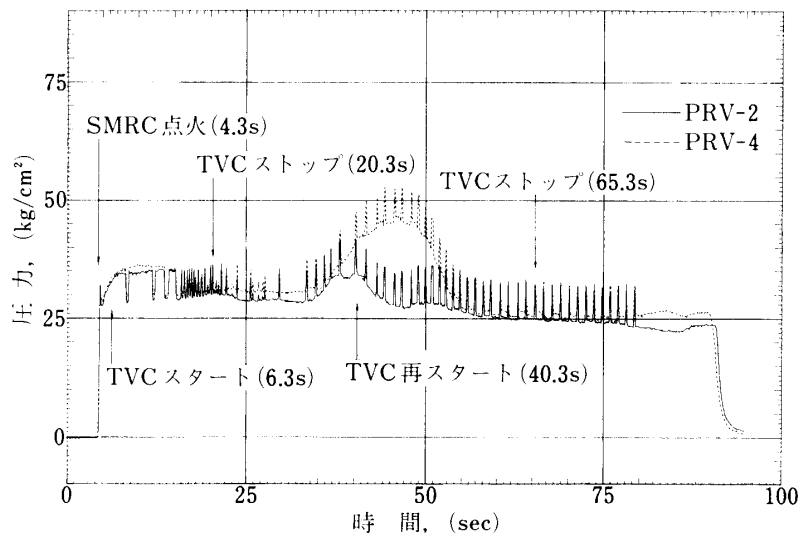
(3) 制御系計測

制御系のモニタとしてM-3H型まで第2段のTVC, SJのタンク圧と周辺温度の計測を行ってきたが, M-3S型では第1段のTVC, ロール制御用SMRCの各種圧力と周辺温度が追加された。また3号機より第2段SJの燃料が過酸化水素 (H_2O_2) からヒドラジン (N_2H_4) に変更されたことにより, エンジン16基のうち4基の噴射圧と1基の温度計測を行うことになった。

第17, 18図は第2段制御系のTVCタンク圧とSJ1, 2次圧の変化を示す。第19, 20図は4基のエンジンの噴射圧と温度の計測結果である。各エンジンの作動状況が概観できる。



第23図 SMRCバルブ内圧測定結果-1 (M-3 S-2)



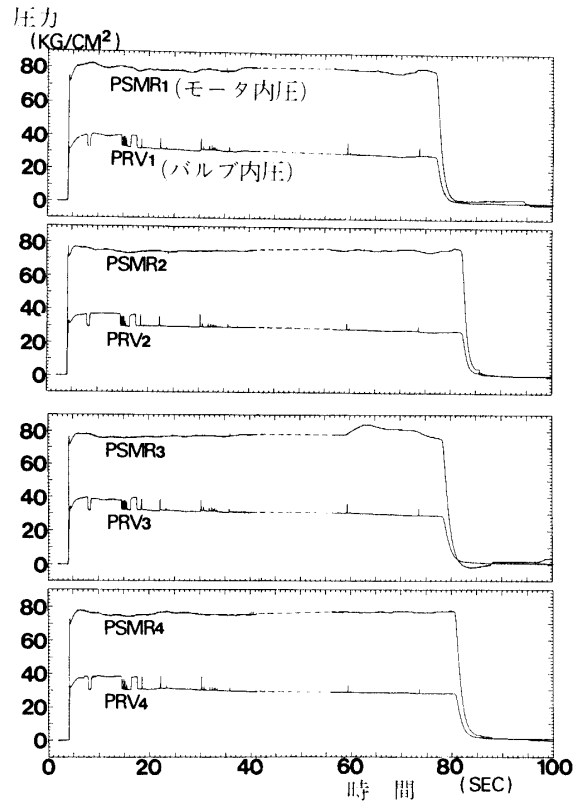
第24図 SMRCバルブ内圧測定結果-2 (M-3 S-2)

第21図は温度計測結果の詳細である。

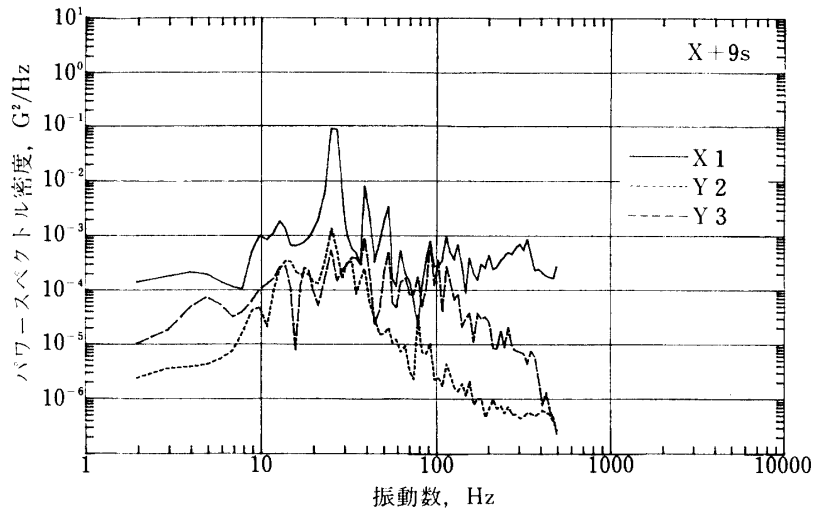
第1段制御系の計測は4機中2機が不具合を起し、一部のデータが得られただけである。

1号機は1個の検出器の不具合が電源を短絡させ、同系統の電源系を持つ9項目のデータを失わせてしまった。2号機は電源系を検出器の電源電圧、計測項目により3グループに分割する変更を行い良好な結果を得たが、3号機で再びモータの燃焼による温度上昇が原因と推定される検出器の破損から一部のデータが得られなかった。次に4機を通じて正常なデータの一部を示す。

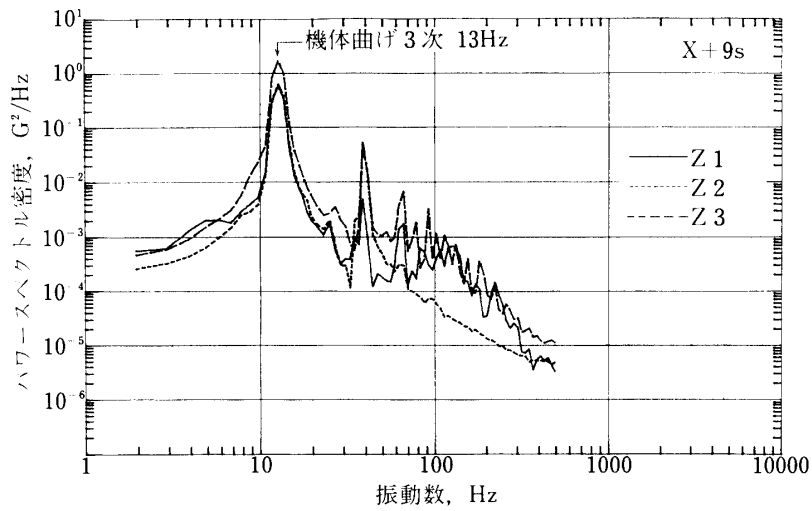
第22図は第1段TVCのタンク圧の変化を示す。第23、24図は2号機のSMRCバルブ



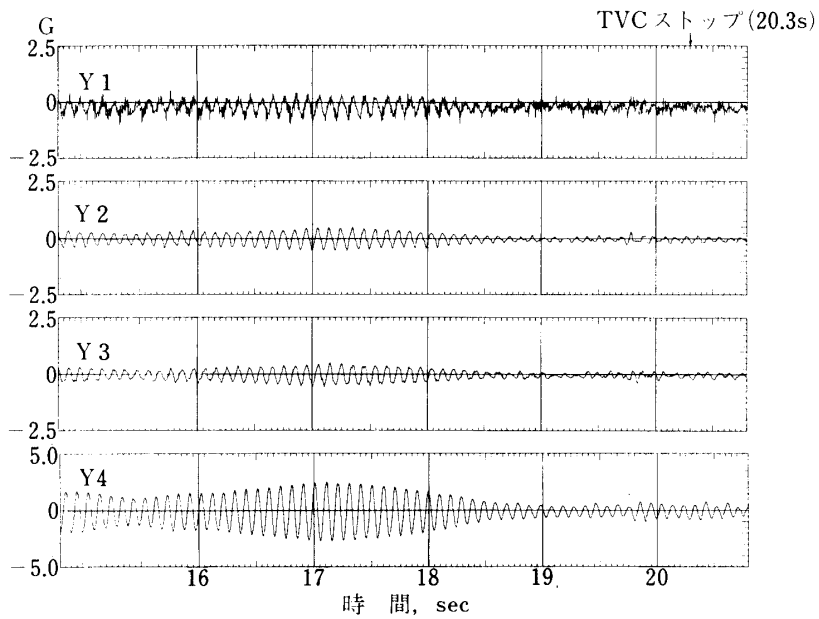
第 25 図 SMRC モータおよびバルブ内圧 (M-3 S-4)



第 26 図 加速度の振動分析結果-1 (M-3 S-1)



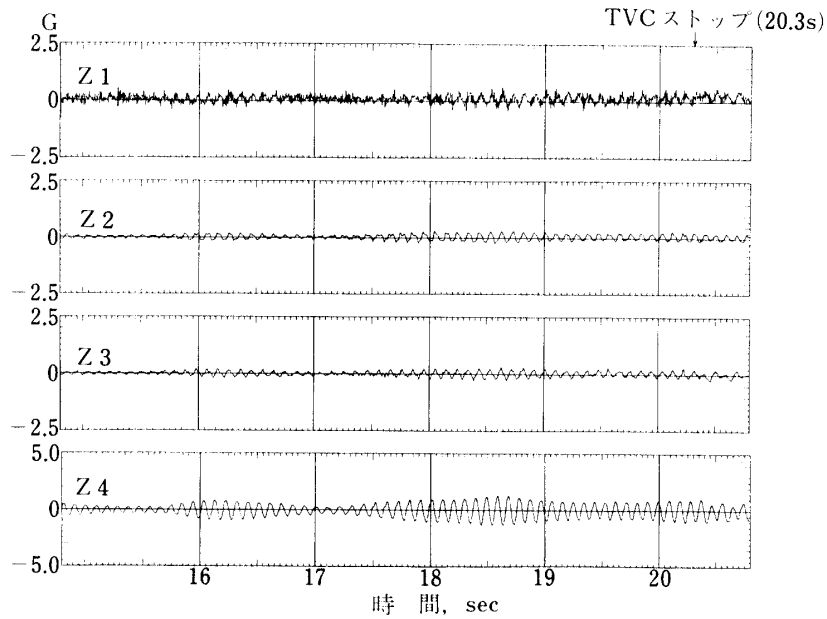
第27図 加速度の振動分析結果-2 (M-3 S-1)



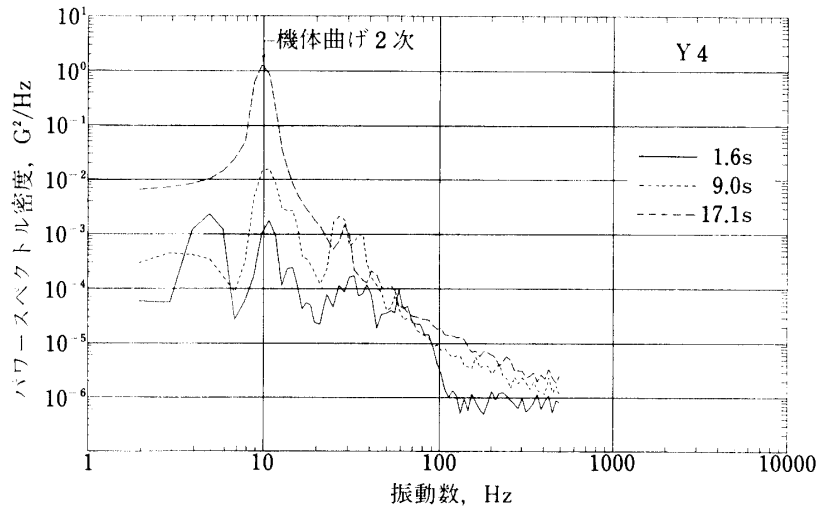
第28図 第1段燃焼中の振動記録-1 (M-3 S-2)

内圧である。4基のモータ内圧の変化と制御によるバルブ作動の状況がわかる。燃焼中期に3基のモータ内圧が異常な値を示しているが、その後、担当班の検討により実際に燃焼内圧に異常があったことが確認されている。この結果、3号機以降ではモータ内圧の計測も合わせて行うようになった。第25図は4号機の計測結果を示す。

このシリーズに先立ち M-3 H-3 号機で第1段尾翼筒内の環境資料は得られていたが、尾翼部先端あるいは制御装置が実際に作動した時の熱的環境は予想以上にきびしいもので



第29図 第1段燃焼中の振動記録-2 (M-3S-2)



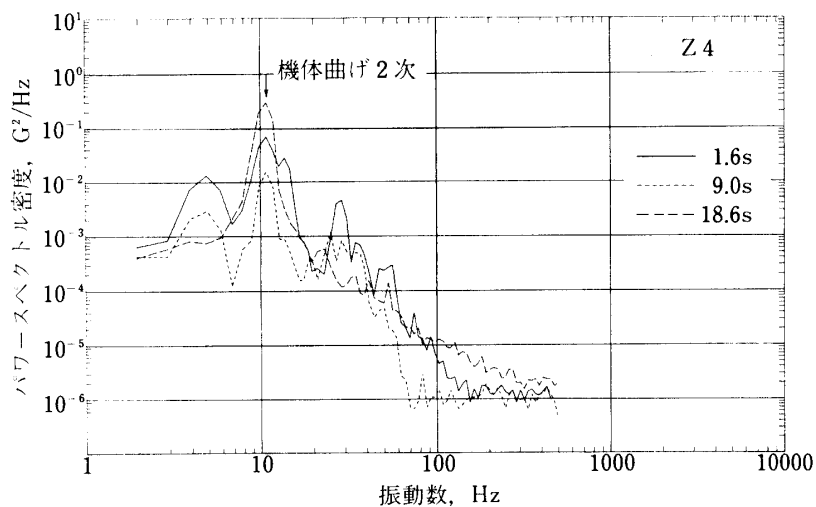
第30図 加速度の振動分析結果-1 (M-3S-1)

あり、今後の機体計装において貴重な教訓を得た。

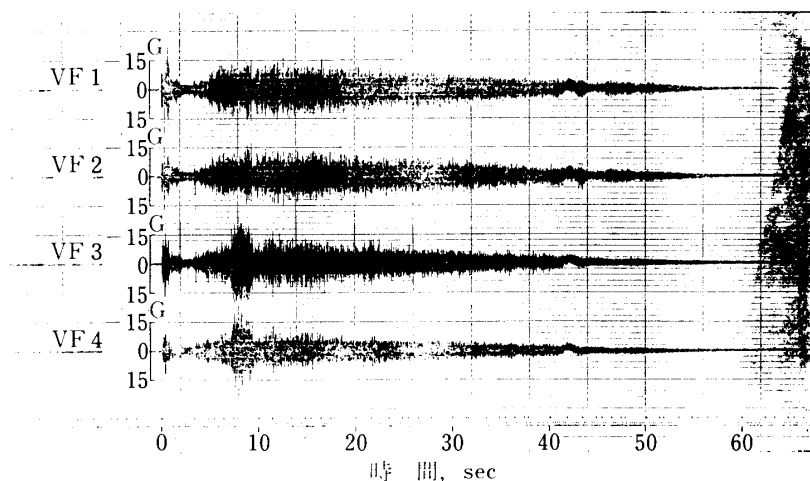
(4) 振動, 衝撃, 音響

飛しよう中に受ける低周波振動, 衝撃は機体に分布した3方向の加速度計と振動計で計測されるが, M-3S型ではSMRCによるロール制御を尾翼先端で行うため尾翼振動の計測を加えている。

このシリーズで特徴的なことは制御系に起因して機体曲げ振動が発生していることである。



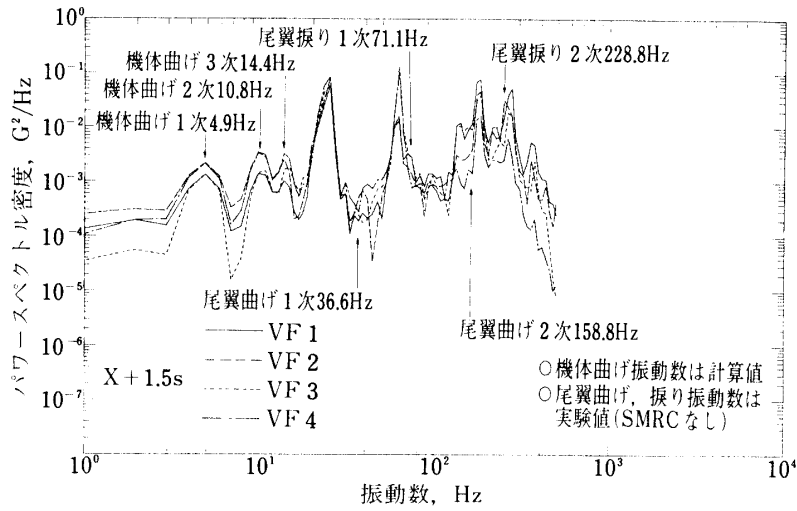
第31図 加速度の振動分析結果-2 (M-3 S-1)



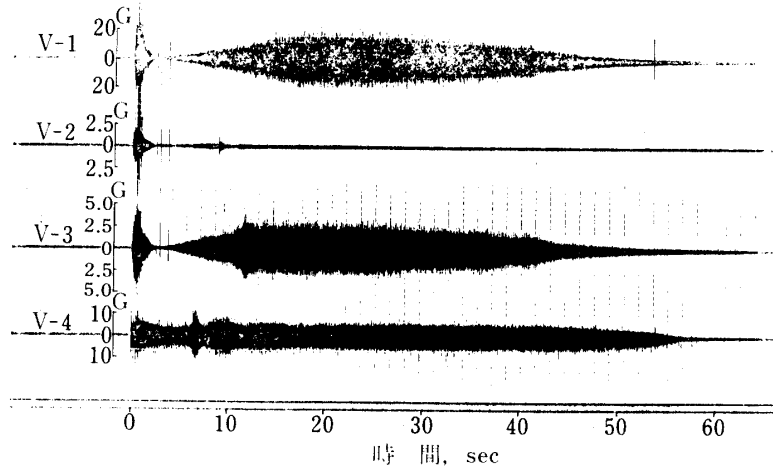
第32図 第1段尾翼の振動記録 (M-3 S-3)

1号機では機体曲げ3次振動を誘起し、6～20秒の間、特に9～14秒に第2段計器部で±5.0G以上の振動を記録している。第26、27図はX+9秒の分析結果を示す。3次振動として13Hzの成分が卓越していることがわかる。2号機も同様に機体曲げ2次振動を誘起した。第28～31図は振動が最大になるX+17秒附近の記録と分析結果を示す。図中、衛星接手部(Y₄, Z₄)で最大±2.5Gを記録している。3号機以降は制御系の改善により、この現象は発生しなくなったが、3号機のTVC再スタート(X+40秒)により急激な姿勢修正が行われ、最大1.5Gの横加速度を受けた。

全機に搭載した第1段尾翼振動の計測結果を3号機の例で示す。第32図は振動記録の概



第33図 尾翼の振動分析結果 (M-3 S-3)



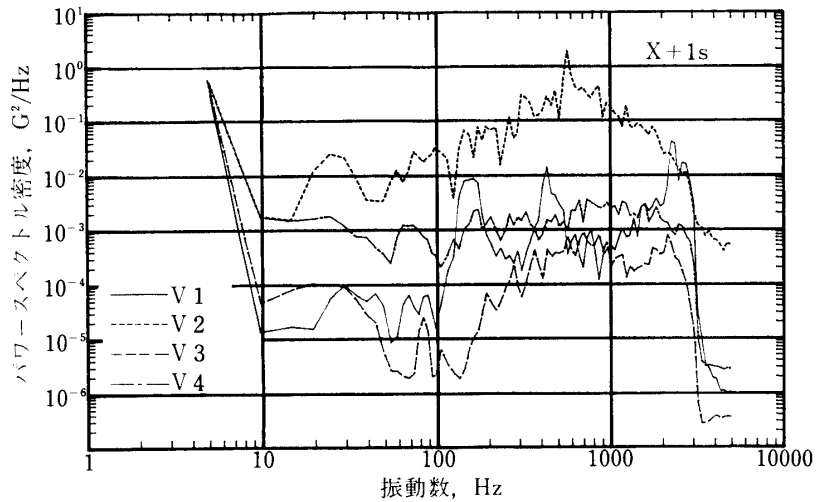
第34図 飛しょう中の振動記録 (M-3 S-2)

要を、第33図に点火時の振動分析結果を示す。4機とも振動形態は同一で誘起される振動数も同一である。図中に示した数値は機体曲げ振動は計算値、尾翼振動は振動試験における実験値である。飛しょう中の実測では振動数が若干異なるがほぼ対応している。

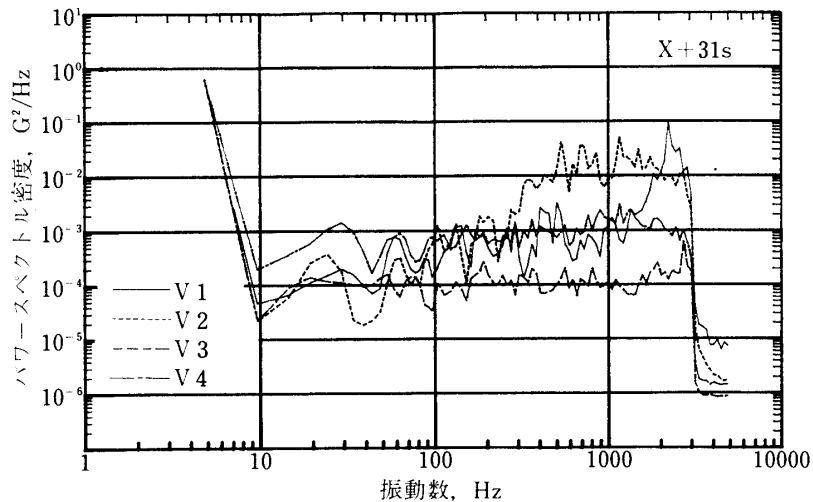
飛しょう中のモータ振動、空気流を振動源とする高周波振動は圧電型検出器を用いた振動計で計測を行う。

測定位置は第1段ノズル部および第2段ノズル部と計器部について4機同一個所とした。ほかに1号機ではノーズフェヤリング、2号機は衛星～第3段接手、3、4号機は衛星を計測した。

第34図に2号機の振動記録を示す。また振動分析結果を1号機の点火時、動圧最大附近



第35図 M-3 S-1号機の振動分析結果-1



第36図 M-3 S-1号機の振動分析結果-2

について第35, 36図に示した。前シリーズと比較してノーズフェヤリング, 第2段計器部が第1段燃焼中にやや大きい振動記録, 振動分析結果より見た振動形態の概略は変わらない。3, 4号機で衛星の振動分析結果から第1段燃焼中, 約28 Hzの成分が顕著であった。衛星の固有振動は環境試験の計測で機軸方向56~62 Hz, 横方向36~38 Hzという結果を得ているので, この28 Hzは衛星+第3段の横振動と推定した。

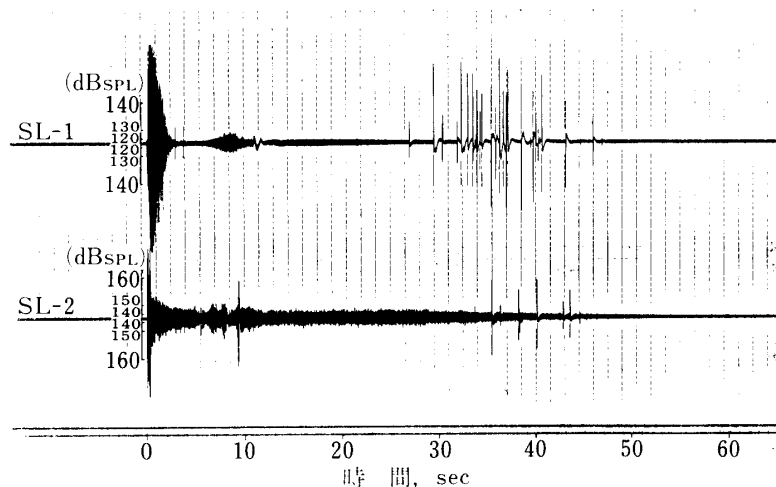
別に加速度計により読取った, 主要イベントにおける振動, 衝撃の読取値を4号機の例で第3表にまとめた。

第37図は第1段ノズル部と第2段計器部における騒音計(音圧)の記録である。

第3表 M-3S-4号機 飛しよう中の振動・衝撃

項目	計画秒時 (SEC)	作動秒時 (SEC)	X	Y _x	Z _x	Y _y	Z _y	Y _z	Z _z	Y _z	Z _z	Y _z	Z _z
B ₁ ・SB点火	0	0.09	2.5 G (26Hz) 3.4 G (178Hz) (320Hz)	6.2 G (12.1Hz)	3.9 G (16.2Hz) 3.4 G (80Hz)	2.5 G (15Hz) (117Hz) (150Hz)	6.0 G (15 Hz) (117.6Hz) (150 Hz)	0.75G (12Hz) (17Hz) (80Hz)	0.62G (10Hz) (20Hz) (106Hz)	0.5 G (16.7Hz) 3.6 Hz (75Hz)	0.9 G (16.7Hz) 4.2 G (70Hz)		
B ₁ ・SB燃焼中	2~8	2~8	1.15G (10.7Hz) (250 Hz)	1.3 G (10 Hz) (25 Hz)	1.1 G (5.2Hz) (25 Hz)	0.6 G (4.7Hz) (16.6Hz) (25 Hz) (35 Hz)	0.35G (25Hz) (33Hz)	0.3 G (20Hz) 0.35G (33Hz)	0.4 G (23.5Hz) (33 Hz)	1.3 G (140Hz)	1.25G (110Hz)		
SB切離し	9	9.06	1.1 G (27.5Hz)	1.1 G (26Hz)	1.2 G (30Hz)	0.85G (35.3Hz)	0.55G (33.3Hz)	0.4 G (33.3Hz)	0.4 G (24Hz)	1.3 G (150Hz)	1.0 G (77.6 Hz) (160 Hz)		
B ₁ 燃焼中	15~23	9.34	0.6 G (5.17Hz) (27.9 Hz)	1.8 G (5.17Hz) (12.5 Hz)	1.8 G (5 Hz) (28.5Hz)	0.7 G (5 Hz) (31.5Hz)	0.5 G (5Hz) (14Hz)	0.6 G (20Hz) (35Hz)	0.3 G (20Hz) (40Hz)	2.5G (40Hz) (100Hz)	3.25G (38Hz) (184Hz)		
			0.15G (25Hz)	1.3 G (12.5 Hz) (25 Hz) 1.6 G (14.7 Hz) (26.6 Hz)	1.2 G (11.1Hz) (25.8Hz) (9.1Hz) (15 Hz) (107 Hz)	0.25G (5 Hz) (105 Hz)	0.2 G (16.6Hz) (23.8Hz)	0.25G (16 Hz) (22.2Hz)	1.6 G (6H, 14H) (20H, 33H) (96H)	2.2G (6H, 14H) (20H, 33H) (96H)			
			0.2 G (—)	0.7 G (26Hz)	1.2 G (15.8Hz) (25 Hz)	0.15G (16Hz) (90Hz)	0.25G (16.6Hz) (33 Hz)	0.2 G (17Hz)	1.43G (6H, 8H) (14H, 96H)	1.63G (8H, 14H) (20H, 96H)			
			0.12G (—)	0.4 G (6.9Hz) (20 Hz)	0.5 G (20Hz)	0.12G (20Hz) (40Hz)	0.12G (19.3Hz)	—	—	—			
B ₁ 切離し	84	84.06	2.05G (260Hz)	0.12G (48.5Hz)	0.2 G (48.2Hz)	0.25G (114Hz)	—	—	—	—	—		
B ₂ 点火	86	86.08	5.1 G (150Hz)	0.2 G (—)	0.3 G (—)	0.85G (—)	0.75G (129.7Hz)	0.15G (—)	0.31G (—)	0.6 G (94.1Hz)	0.95G (94.1Hz)		
B ₂ 燃焼中	125~130	138~146	0.12G (—)	0.68G (12.8Hz) (29.4Hz)	0.62G (13.3Hz) (29.4Hz)	0.37G (13.3Hz) (30 Hz) (75 Hz)	0.36G (15Hz) (60Hz)	0.22G (30Hz)	0.3 G (30Hz)	—	—	—	
			0.85G (325Hz)	0.66G (13.6Hz) (35 Hz)	1.4 G (13.5Hz) (33.3Hz)	0.42G (13.3Hz) (33.3Hz) (75 Hz)	0.77G (13.3Hz) (32.9Hz) (75 Hz)	0.47G (13.3Hz) (33.3Hz) (75 Hz)	0.46G (14.2Hz) (33.3Hz) (75 Hz)	—	—		
			0.35G (250Hz)	1.12G (13.7Hz) (34.1Hz)	1.22G (16.1Hz) (34.6Hz)	0.8 G (34.4Hz)	0.8 G (35 Hz) (76.9Hz)	0.61G (34.1Hz) (60 Hz)	0.65G (35.2Hz) (74 Hz)	—	—		
			1.5 G (197Hz) (280Hz) (380Hz)	0.12G (16 Hz) (46.2Hz)	0.19G (48.5Hz)	0.72G (110Hz)	0.47G (150Hz)	—	—	—	—		
開頭	162	162.06	1.5 G (280Hz) (380Hz)	0.12G (46.2Hz)	0.19G (48.5Hz)	0.72G (110Hz)	0.47G (150Hz)	—	—	—			
スピンモータ点火	241	241.06	1.55G (127Hz) (357Hz)	0.21G (15.1Hz) (48.2Hz)	0.34G (15.8Hz) (47.6Hz)	0.55G (166.2Hz) (70 Hz) (140 Hz)	0.7 G (7.8Hz) (16.1Hz) (60 Hz) (120 Hz)	0.12G (—)	0.15G (—)	—	—		
スピンモータ停止	—	245.55	7.5 G (280Hz) (400Hz)	0.2 G (47.4Hz)	—	1.35G (66.6Hz) (90.9Hz)	2.1 G (85.7Hz)	0.65G (41Hz) (75Hz)	0.75G (85.7Hz)	—	—		
B ₂ 切離し	375	375.06	6.2 G (153 Hz) (282.4Hz)	—	—	5.1 G (153.8Hz)	4.2 G (148.8Hz)	0.9 G (147.3Hz)	0.75G (140Hz)	—	—		
B ₃ 点火	380	380.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
総合テストホンス	—	—	330 Hz	70 Hz	70Hz	220 Hz	160 Hz	110 Hz	81 Hz	110 Hz	81 Hz		

(注) 1) 加速度の値は振動衝撃成分のみ記してある。 2) Gの値は全振幅を表わす。 3) 微少とは0.1G以下である。 4) X:縦方向加速度計 Y,Z:横方向加速度計



第37図 飛しよう中の騒音記録 (M-3S-2)

5. む す び

以上、M-3S型の機体計測について概要を述べた。上記では触れなかったが、集中電源モニタ、制御系配管の漏れ検出器、各種シーケンス確認計等も正常に機能した。

4機の計測結果を通じて上段部の計測項目はM-3C、M-3H型と同一で計測精度も向上したと自認しているが、新たに加わった第1段制御系の計測に2機も不具合が発生したことは遺憾であり、担当班に対してお詫びしたい。

次のM-3S II型より更に新規項目が加わるので一層の注意をもって望みたい。

最後に、計測データのユーザーとして数多くの助言を頂いた本研究所の先生方および実験班各位、ならびに計測器の製作を担当された松下通信工業の多くの技術者の方々に厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] 今沢茂夫, 小野淳次郎, 中田篤: M-3Sの機体計測, 東大宇宙航空研究所報告 第14巻, 第1号(B), 1978年3月
- [2] 今沢茂夫, 小野淳次郎, 中田篤, 富沢利夫: 機体計測, 東大宇宙航空研究所報告 第16巻 第1号(B), 1980年2月.