

M-V ロケットの推力方向制御（TVC）

安田誠一^{*}，森田泰弘^{**}，高野雅弘^{*}，柳澤昇^{**}
大塚浩仁^{***}，佐藤豊^{***}，湊将志^{***}，増田純一^{***}

1. はじめに

M-V ロケットの第1段推力飛翔中のピッチ/ヨー姿勢制御は，4号機までと同様のM-14モータに装着される可動ノズル（M-14MNTVC）装置により行う．同期間中のロール制御は，後部筒カウリング内に収納される4基の固体モータロールコントロール（SMRC）装置によって行う．尚，SMRC装置は，4号機までの16基から4基に変更されている．変更内容の詳細は，SMRC装置の項に記述する．

第2段推力飛翔中のピッチ/ヨー姿勢制御は，新規開発品のM-25モータに装着される可動ノズル（M-25MNTVC）装置によって行う．4号機までは，噴射体噴射方式（M-24LITVC）を採用している．同期間のロール制御は2/3段接手部に装着される2基のSMRC装置により行い，2段モータ燃焼終了後の3軸制御はSMRCと同一仕様の固体モータサイドジェット（SMSJ）装置4基を1/2段接手外周部に搭載している．

第3段推力飛翔中のピッチ/ヨー姿勢制御は，4号機までと同様のM-34モータに装着される可動ノズル（M-34MNTVC）装置により行う．同期間のロール制御及びモータ燃焼終了後の3軸制御はヒドラジンサイドジェット装置を用いている（詳細はSJ装置の項を参照願いたい）．

2. M-14（第1段）MNTVC装置

M-V ロケットでは，1段モータ燃焼末期に2段モータの点火と同時に分離する段間分離方式（ファイア・イン・ザ・ホール[FITH]）を採用している．この方式は，分離時に発生する横推力が大きな不確定要素になっており，安全な分離のために燃焼末期/分離時まで制御効果を維持することが望ましい．以上により選定されたM-14MNTVC装置は，燃焼全期間を通じて約9%（以上の比率は何れも最大コマンドにて）となり，最大制御力の増大とともに推力プロファイルをうまく設計することにより1/2段分離時まで安定した制御効果を期待することができる．

M-14MNTVC装置は，固体推進薬ガスジェネレータ（SPGG），ターボポンプにより油圧力を発生させ，アクチュエータに供給する方式である．サーボアクチュエータはピッチ/ヨー各軸に1基ずつ搭載し，その対称軸には，ポテンシオメータ内蔵のリファレンスロッドを搭載する．アクチュエータは，モータ側ジョイントホルダとノズル側コンプライアンスリング間に装着し，ジョイントホルダとノズルの結合部は，フレキシブルジョイントと呼ばれるゴムと金属の多層積層構造となっている．このフレキシブルジョイントは，モータ燃焼内圧により変形す

* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA
** Office of Space Flight and Operation / JAXA M-V Project Team
*** IHI Aerospace Co., Ltd.

るため、推力軸にミスアライメントが生じる。以上のミスアライメントは、リファレンスロッドに内蔵されているポテンシオメータで感知し、その出力をサーボ系内部でフィードバックしてバイアス量を補正する。

油圧供給系は、SPGG、ターボポンプ、チェックバルブ、フィルタ、リザーバタンク、リリーフバルブにより構成される。油圧回路は、閉回路になっており、オイルは循環させて使用する。油圧経路は、SPGG燃焼ガスの供給によりターボポンプを駆動し、リザーバを通して規定の圧力/流量の作動油をアクチュエータに供給する。供給後のオイルはリザーバに戻り、ポンプの必要吸い込み圧力を発生させる。タービン駆動ガス源としては、システムの単純さ、取り扱いの簡便さ及びコスト低減の観点から固体推進薬ガスジェネレータを採用している。

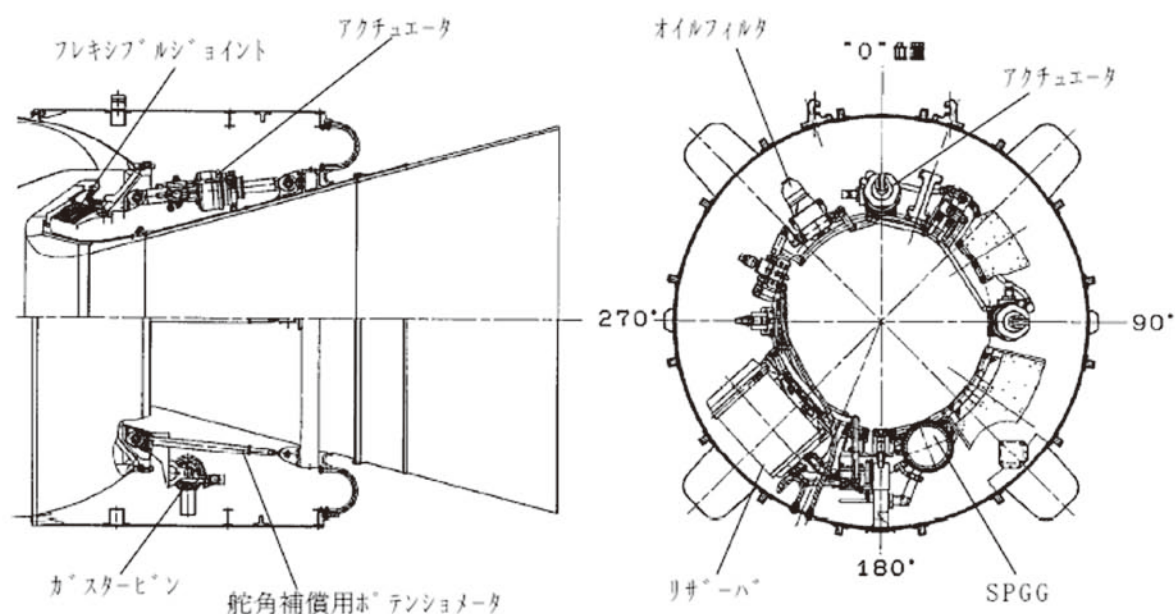
表-1にM-14MNTVC装置の仕様及び諸元を、図-1に装置概要を示す。

表-1 M-14MNTVC装置の仕様及び諸元

項 目	仕 様
TVC システム	可動ノズルTVC (MNTVC)
アクチュエータ	電気/油圧比例制御式サーボアクチュエータ (2基)
油圧供給システム	ターボポンプ (固体推進薬式ガスジェネレータ[SPGG]の燃焼ガスにより駆動)
諸 元	
TVC 制御帯域	2.4Hz 以上 (油圧 18.62MPa で $\pm 0.1^\circ$ 駆動時)
最大舵角	5° 円
最大舵角速度	12.5°/s 以上 ($\pm 2^\circ$ 駆動時)
最大横推力	323.4kN (最大主推力 3712kN 時)
ノズル作動方向	ピッチ、ヨー方向及び合成方向
ジョイントスプリングトルク	$24.89 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ 以下 ($P_c = 5.88 \text{ MPa}$, 舵角 5°)
TVC 固有振動数	8Hz 以上 ($\pm 0.1^\circ$ 駆動時)
モータ内圧によるノズル軸変位	11.8mm 以下[フレキシブルジョイント単体] ($P_c = 5.88 \text{ MPa}$)
油圧源発生油圧	19.40~22.04MPa (TPA 入口圧 min[6.13MPa]時)
作動油	MIL-H-83282

ノズルの最大制御舵角は 5° で、推力ミスアライメント、重心オフセット、空力データ不確定性、風の分散及び燃焼速度のバラツキによって生じる予想迎角の最悪値（角誤差源による迎角寄与の単純和）の時間履歴を基に2倍のマージンを見込んで設定した。バンド幅については、高い方が応答性は良くなるため制御の観点からは望ましい。しかし、バンド幅はノズル剛性にも依存し、あまり高くすると重量が増加することと、機体の曲げ基本周波数が6Hz程度であることを考慮して3Hzを設計値とした。M-14MNTVCシステムには、コンプライアンスリングの剛性に起因して10~15Hz付近にゲインのピークがある。このような高周波のピークをCNE側で処理するにはオンボード計算機に対する負荷が大きいため、TVC側のサーボアンプ側で処理するのが望ましく、このゲインピークを落とすためのフィルタがサーボアンプ内に組み込まれている。

尚、開発経緯及び開発試験の詳細は、宇宙科学研究報告「M-V ロケット成果報告（1号機から4号機まで）」を参照願いたい。



図－1 M-14MNTVC装置概要

2.1. 構成品の概要

2.1.1. フレキシブルジョイント

フレキシブルジョイントは、IRエラストマ（エラストマ：IR30NB）と金属（リインフォースメント：4340鋼）の多層積層構造になっており、ノズルとチャンバをこのジョイントにより結合することでノズルを偏向させることができる。

表－2にM-14MNTVC装置構成品の諸元を示す。

2.1.2. サーボアクチュエータ

アクチュエータは、電気/油圧式サーボアクチュエータで、サーボバルブ、ポテンシオメータ、シリンダ及びピストンで構成され、M-14モータ側ジョイントホルダとノズルコンプライアンスリング間に装着する。

2.1.3. 舵角補償用ポテンシオメータ

舵角補償用ポテンシオメータは、ピッチ、ヨー軸に各々のアクチュエータの対称位置に艤装され、モータ内圧によるフレキシブルジョイントの変位及びノズル駆動に伴う推力軸のミスアライメントを補正する。これは内蔵されるポテンシオメータの出力をサーボアンプにフィードバックして位置の補正を行うもので、ノズル偏向角誤差を0.1°以内に抑える能力を有している。

2.1.4. サーボアンプ

サーボアンプは、CNEからの入力信号、フィードバック信号及び舵角フィードバック信号に基づき演算を行い、サーボバルブにコマンド信号を出力する。

2.1.5. 固体推進薬ガスジェネレータ（SPGG）

SPGGの推進薬としては、低燃速型（GGP-8A：標準燃速3.8mm/s）を使用する。SPGGのサイジングは、ターボポンプの入力要求に基づき決定する。温度による発生ガス量の変化は、リザーバに対して余分な排熱要求を課すため、温度範囲の設定は重要である。現在、モータケース平行部の断熱性を考慮し、余裕をみて温度範囲は0～40℃としている。作動時間は、リフトオフ前起動時間15s、M-14モータ燃焼時間75s、マージン10sとして100sに設定した。

2.1.6. ターボポンプ

ターボポンプは、既存品に最小限の改修を行い、開発コストの低減化を図る。ガスタービンとは軸流式、ポンプは遠心式を採用している。本ターボポンプのデューティサイクルは燃焼ガス 100s × 1 回、ヘリウムガス 100s × 2 回 + 30s × 15 回である。

2.1.7. リザーバ/バルブ類

リザーバは、ブーツストラップタイプを採用する。リザーバのサイジングは排熱要求により設定されるが、容量は最大約 58ℓ となっている。油圧回路には他にターボポンプ吐出口下流のアクチュエータ供給回路にボール弁式のチェックバルブ及びオイルフィルタが搭載され、アクチュエータからリザーバへの戻り回路には、ターボポンプ排熱による作動油の膨張分を排出し、リザーバ圧力を調圧するリリーフバルブが搭載されている。

表－2 M-14MNTVC 装置構成品の諸元

油圧アクチュエータ	方式	油圧サーボ方式
	定格油圧	20.57MPa
	応答性	2.4Hz 以上 (0.1°相当)
	定格出力	402kN 以上
	無負荷最大速度	178mm/s
	アクチュエータストローク	+72.8mm, -60.2mm
舵角補償用ポテンシオメータ	方式	リニアポテンシオメータ
	定格電圧	±10V
	全抵抗値	1500Ω
	電氣的ストローク	±100mm
サーボアンプ	方式	アナログサーボ
	定格電圧	+18V
	ドライバ方式	電流駆動
	消費電力	1.5A
ターボポンプ	方式	固体推進薬ガスジェネレータ方式
	ガス入口圧力	9.78MPa 以下
	ガス入口温度	1098℃以下
	オイル入口圧力	0.21~2.20MPa
	定格吐出圧力	20.57MPa
	定格吐出流量	356ℓ/min
	タービン回転数	65000~70000rpm
オイルリザーバタンク	容積	初期：53.8ℓ, 最大：57.9ℓ
	リザーバ内圧	2.20MPa 以下 (リリーフ弁付)
	ブーツストラップ圧力	23.31MPa 以下
	吐出圧	0.21MPa 以上
	作動温度	233℃以下

2.2. フライト結果

M-14MNTVC装置の5～8号機におけるノズル偏向角履歴，燃焼初期応答，制御開始時ノズル過渡応答，Pc（M-14モータ内圧）バイアス推定量，サーボバルブ熱衝撃，制御終了時ノズル偏向角，HPU（油圧）特性，SPGG燃焼特性，TPA（ターボポンプ）特性は，すべてにおいて良好な結果が得られた。

2.2.1. ノズル偏向角履歴

ノズル偏向角履歴は，すべての機体において指令ノズル偏向角に対する応答ノズル偏向角の履歴に異常はなく，指令に対する応答の偏向角誤差も過渡応答時を除き，要求値 $\pm 0.1^\circ$ 以内を満足する結果となった。

図-2-1～3にM-14MNTVCノズルの偏向角履歴（6号機）を示す。

2.2.2. 燃焼初期応答

Pcバイアスにより発生するノズル最大偏向角は，すべての機体においてピッチ，ヨーともに -0.4° 程度，合成方向に -0.5° 程度であり，約0.25sで再度中立位置に安定している。

本結果は，過去の地上燃焼試験，全フライトデータと同等で，モータ内圧立ち上がり時のノズル軸変位に対し，ポテンショフィードバックによる偏向角補償機能が正常に機能したことを示している。

2.2.3. 制御開始時ノズル過渡応答

制御開始時の比較的大きな指令偏向角に対するノズル応答速度は，すべての機体において要求値： $12.5^\circ/\text{s}$ 以上を満足する結果が得られている。

図-3-1, 2に制御開始時のノズル過渡応答結果（6号機）を示す。

2.2.4. Pcバイアス推定量

モータ内圧立ち上がり初期におけるPcバイアス最大値は，約8mmで，地上燃焼試験，及び全フライトデータとも同等の結果であり，F/J（フレキシブルジョイント）が正常であることを示している。

2.2.5. サーボバルブ熱衝撃

熱衝撃（シリンダ・ピストンのクリアランスが小さいバルブ内に作動油が急激に流入したときに起きる事象）の影響により発生するスレッシュールドレベルの増加を確認するためにアクチュエータシリンダ内温度を確認したが，フライト中の温度変化率は $1^\circ\text{C}/\text{s}$ 以下であったため，熱衝撃はなくスレッシュールドレベルは正常な値であったと判断している。

2.3. HPU特性

図-4-1～5にHPU関連データ（6号機）を，図-4-6にHPU立ち上がり履歴（6号機）を示す。

2.3.1. SPGG燃焼特性

定常燃焼は，X+90sまで継続しており，その要求値を十分に満足している。圧力立ち上がり特性についても，1s以内に6.28MPa以上の要求に対し，良好な結果が得られている。ガス流量率については，下記のTPA性能の評価結果より問題はないと判断する。

2.3.2. TPA性能

タービン回転数，TPA入口圧，TPA吐出圧は，全て予測範囲内で安定し，いずれの立ち上がり時間も要求の1s以内であり問題ない。TPAの排熱量は，リザーバ内油温上昇量が 100°C 以内であり，システム試験と同等の結果であることから正常であったと判断できる。また，X+40sにリリーフバルブの作動が確認でき，リザーバタンクベローズ特性とオイルリリーフ機能は正常であったことが確認できる。

以上の機能は，全フライトにおいて正常であった。ここでは6号機のデータ（図-2-1～3，図-3-1, 2，図-4-1～6）をもってTVCの各種機能の健全性をご確認頂きたい。表-3には，フライトにおけるM-14MNTVCの5～8号機のTVC性能を示す。

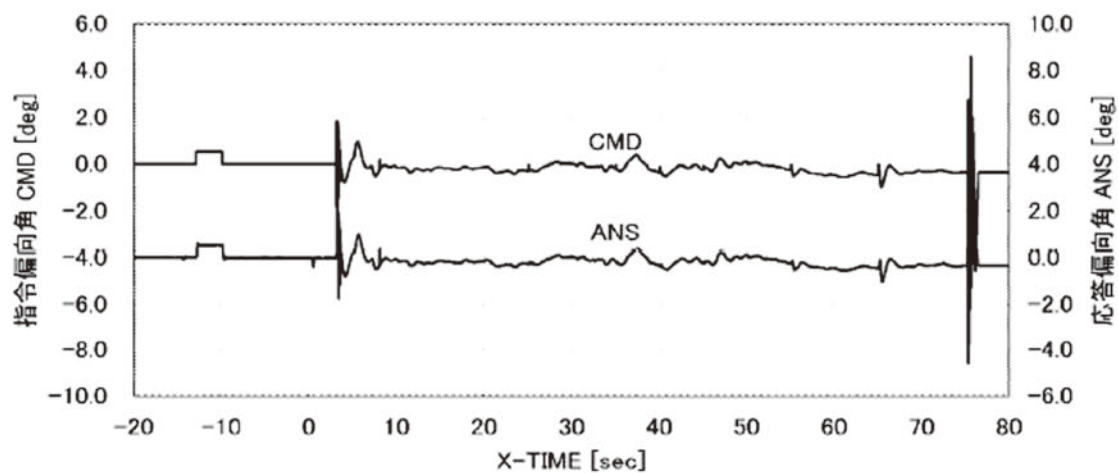


図-2-1 M-14MNTVC偏向角履歴 (Pitch)

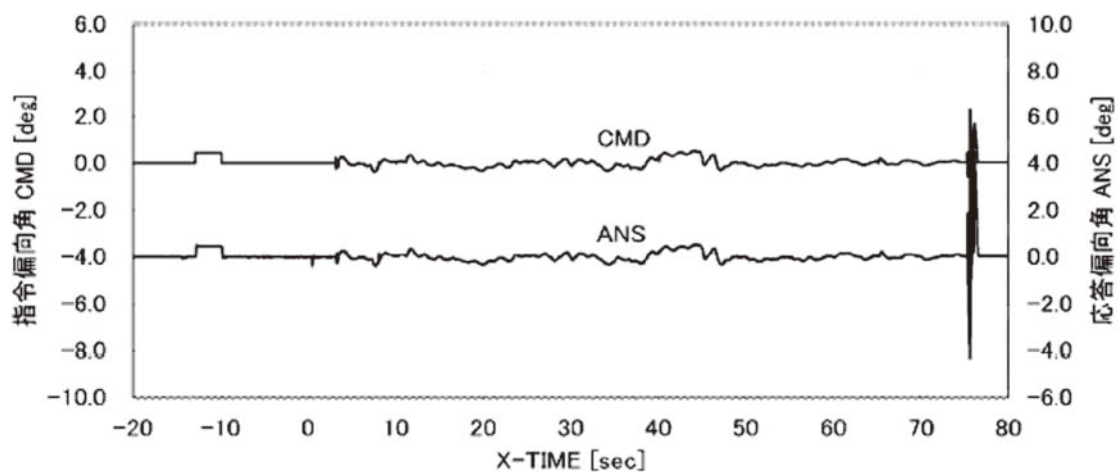


図-2-2 M-14MNTVC偏向角履歴 (Yaw)

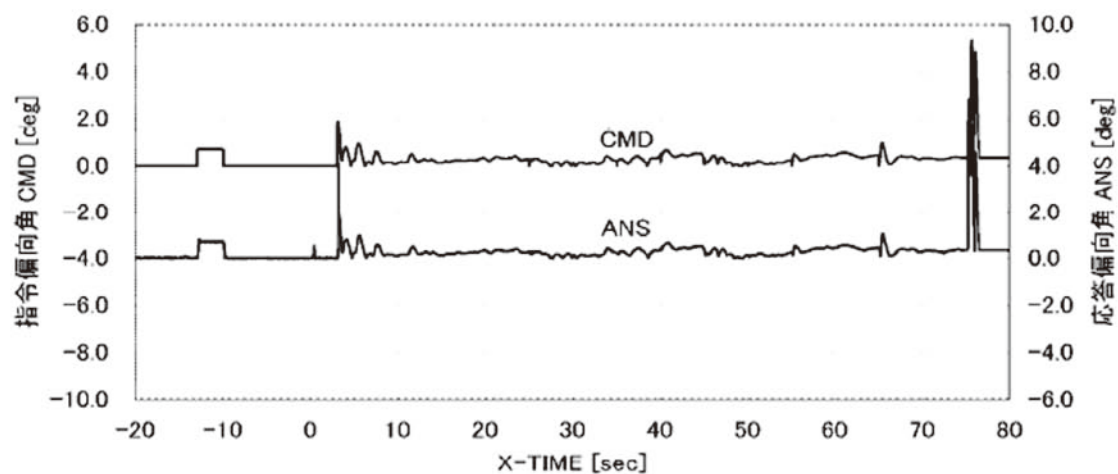


図-2-3 M-14MNTVC偏向角履歴 (Norm)

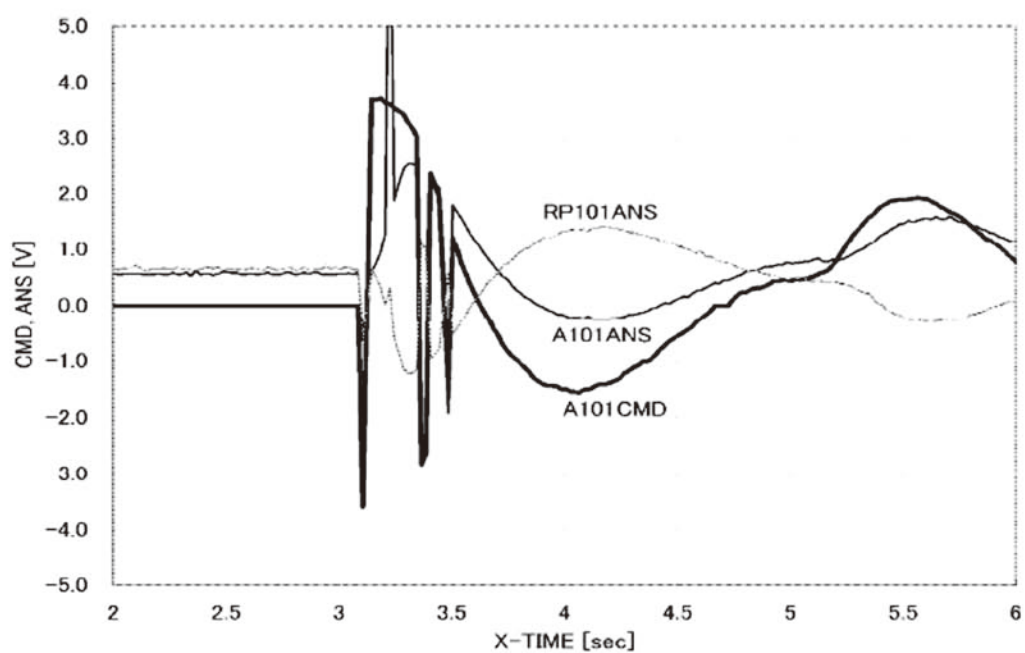


図3-1 M-14MNTVC制御開始時応答特性 (Pitch)

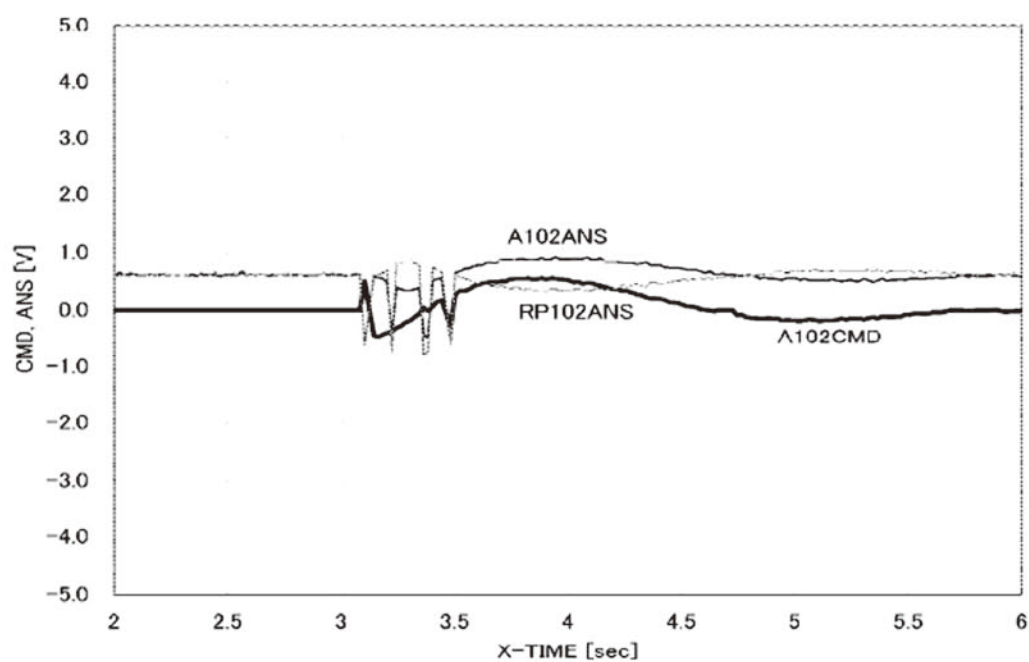


図3-2 M-14MNTVC制御開始時応答特性 (Yaw)

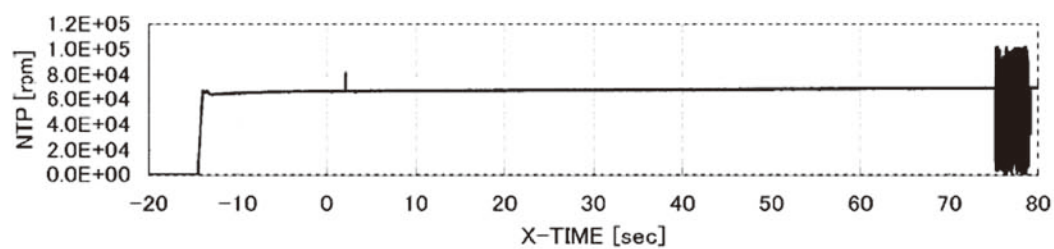


図-4-1 TPAタービン回転数

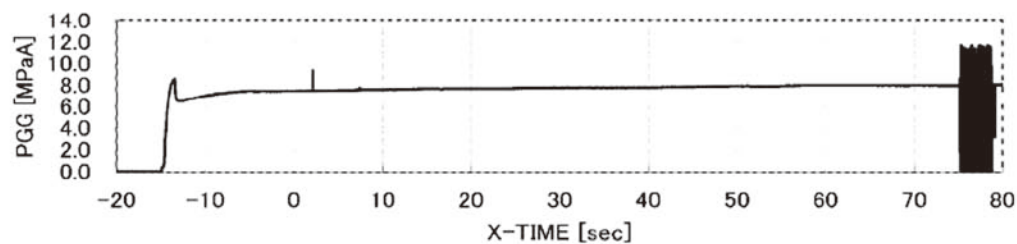


図-4-2 SPGG燃焼圧力

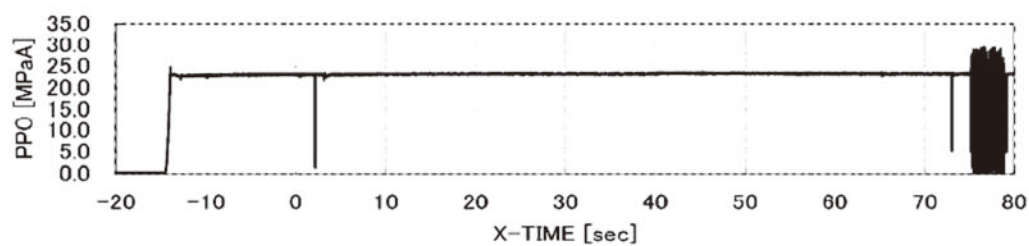


図-4-3 TPA吐出油圧

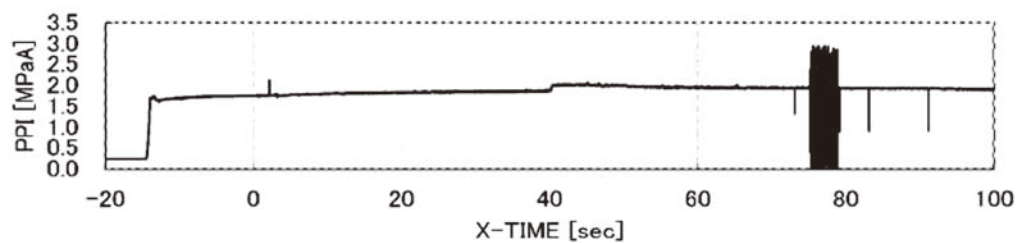


図-4-4 TPA入口油圧

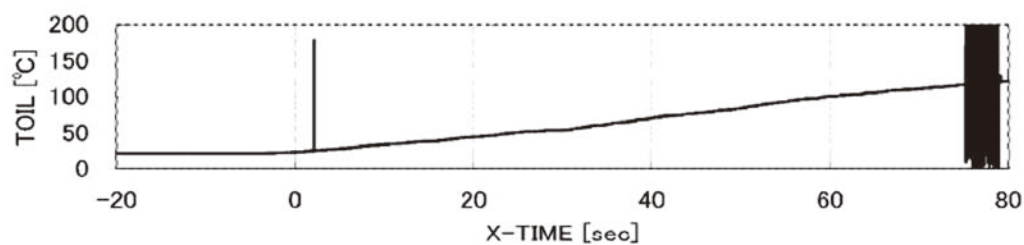


図-4-5 リザーバタンク内油温

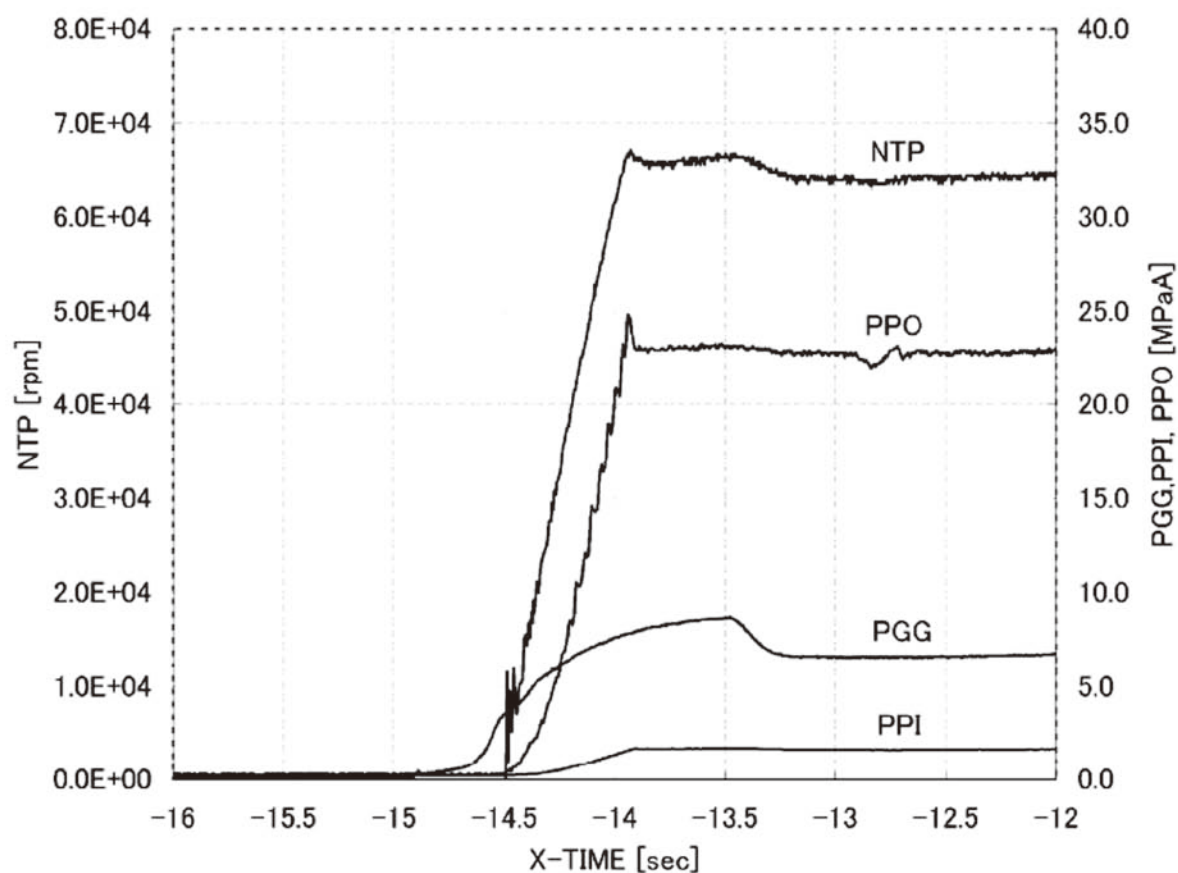


図-4-6 HPU立ち上がり特性

表-3 M-14MNTVC 5～8号機TVC性能

		M-V-5	M-V-6	M-V-7	M-V-8
TVC 性能	最大偏向角	2.4° (Norm)	2.0° (Norm)	1.4° (Norm)	2.8° (Norm)
	偏向角誤差	±0.1°以内	±0.1°以内	±0.1°以内	±0.1°以内
	最大駆動速度	16.3°/s (P)	14.8°/s (P)	11.8°/s (P)	16.2°/s (P)
	@CMD 約±2°時	—	—	1.5°/s (Y)	14.6°/s (Y)
HPU 性能	SPGG 内圧	7.63～7.83 MPaA	7.50～8.07 MPaA	7.78～8.21 MPaA	7.35～7.64 MPaA
	TPA タービン回転数	65000～68000 rpm	64000～68800 rpm	64400～68000 rpm	63600～67600 rpm
	ポンプ吐出圧	23.0～23.1 MPaA	22.9～23.4 MPaA	22.5～22.9 MPaA	23.2～23.5 MPaA
	リザーバ圧力	1.7～2.0 MPaA	1.6～2.0 MPaA	1.6～2.0 MPaA	1.6～1.9 MPaA
F/J 特性	Pc バイアス量	約 8mm @5MPaA	約 8mm @5MPaA	約 8mm @5MPaA	約 8mm @5MPaA

3. M-25（第2段）MNTVC制御装置

M-V 第2段の制御装置は、5号機より M-34MNTVC と同様の電動アクチュエータを採用した。電動アクチュエータとしては大型の電動モータを採用して、実機コストの低減だけでなく、整備日数も大幅に短縮して運用コストの低減を図った。また、TVC ノズル軸に対して、アクチュエータ軸を斜め配置し燃焼初期の発生荷重を低減し、かつ、ブラケット等も TVC ノズル構造と一体の艤装方式を採用することで、TVC システムとして独立した試験が可能になっている。

駆動源である電源は、電動アクチュエータの高電圧、高パワー（ワット数）に対応でき、電源として軽量化が見込める熱電池の採用に至った。

3.1. M-25MNTVC 装置の開発経緯

M-V 第2段の TVC 装置は、1～4号機まで M-24LITVC を採用していた。これは M-3S II の第1段 TVC 装置の比例弁による2次噴射装置を大型化して、FITH 分離方式による横方向の外乱や、1/2段分離時の動圧条件と残留迎角の大きな空力外乱に対して、分離後の TVC の制御力を即座に発生することが可能なシステムである。また、LITVC は、油圧駆動により比例弁の比例制御を行うことで、MNTVC 方式に比べ、応答性がよく、ある程度までは線形性を保ったまま大横推力を発生することができる特性を有していた。しかしながら、LITVC のチタンタンクや比例弁の実機コストが高いことと、2次噴射の噴射体（SP55）の充填や排出等の手間や配管や比例弁からのリークチェック等で運用コストも高いという欠点もあった。そこで、実機コストや運用整備の簡素化を図るために、M-34MNTVC ですでに採用していた電動アクチュエータによる MNTVC 開発の可能性を探った。システムの課題としては、1/2段分離時の空力外乱に対して、LITVC よりも制御応答性の劣る MNTVC で第2段の制御性が確保できるか、M-34MNTVC の性能と同等の制御性能を有する電動アクチュエータの大型化が図れるか、燃焼初期のアクチュエータ荷重軽減が図れるか等と、コスト低減効果について議論された。以上の課題に対する検討結果から、第2段 TVC 装置として電動アクチュエータを採用することが可能と判断し、開発着手に踏み切った。

3.2. 熱電池の開発経緯

熱電池の採用については、電動アクチュエータの高電圧、高パワー（ワット数）に対応でき、軽量化が図れる。すなわち、W/kg の効率が他の電池に比べて高い性能を有するためである。また、充放電のような運用に手間がかかる2次電池に対して熱電池は充放電等の手間が不要であることもメリットとして挙げられる。

熱電池は、すでに H-II A で開発済みの単電池2本を使いパッケージ化したもので、既開発品ということで開発費の削減になっている。

3.3. システム検討の概要

M-25MNTVC システム仕様の設定にあたっては、下記の項目が検討された。

3.3.1. 1/2 段分離時の外乱要因検討

1段分散解析による1/2段分離時の迎角、残留レートを求め、かつ FITH 時の横外乱推定を行い、M-25MNTVC 仕様検討のための条件設定を実施した。

表-4に1/2段分離条件の検討結果を示す。

3.3.2. 2段制御開始時刻と分離面位置の最適化

打上能力を確保するためには、分離面をなるべく機体上方に配置することで2段イナータ重量の軽減が可能となるが、一方、FITH 中に1/2接手内をノズルが抜けるために必要な距離も伸びて、1段と2段の相対運動で分離クリアランスが取れなくなる。また、ノズルが接手内から抜け出すまでは TVC のノズルを一定に保ちクリアラ

ンスを確保する必要があるため、接手を抜けてから制御を開始する。このことから分離面を上方に設定すると制御の開始時間が遅れ2段燃焼初期の空力外乱による姿勢の立て直しができなくなる。よって姿勢と打上能力の確保のための要求を考慮した最適分離面位置を解析検討により設定した。

表－4 1/2段分離時条件検討結果

項 目	条件数値	備 考
条件	0.65kPa	1 段分散要因の RSS 評価
迎角	4.3°	1 段分散要因の RSS 評価
姿勢レート	0.4°/s	1 段分散要因の RSS 評価
FITH 時外乱	N・s	横力
2 段初期ミスアライメント	0.21°以下	2 段初期のミスアライメントの配分

3.3.3. TVC 要求仕様

2段MNTVCの最大舵角及び最大速度は、2段初期迎角による空力外乱とFITHによる1段からの噴煙反射で発生する横力方向の外乱による姿勢の収束性から設定した。マージンとしては、2段初期迎角の見積もり値の2倍の迎角があっても収束することを条件として設定した。その結果、最大舵角は5°（サークル）及び最大速度10°/sが必要となる。ただし、この条件では、大振幅時の安定性に問題があり、次項の非線形飽和特性における安定性が確保できる最大速度をさらに設定した。

3.3.4. 2 段制御開始時の大振幅応答における非線形特性と姿勢制御系の安定性限界の検討

電動アクチュエータの最大速度は、ソフトウェアによる速度リミット値で設定される。よって制御安定性については、アクチュエータの速度飽和という非線形性を考慮しなければならない。油圧であれば、サーボバルブの流量飽和特性に相当するものである。この影響は、姿勢誤差が大きくなったときに出力されるTVCコマンドが大きいくほど現れ、安定マージンを減少させる。大振幅時の安定性を検討して最大速度飽和値が3.3.3項で定められた要求値をさらに改善して16°/s以上で安定性が確保されることを6DOFシミュレーションで確認した。

3.3.5. TVC 帯域：M-24LITVC と同等の線形特性の確保

M-24LITVCの帯域は4Hzで設定され、制御系設計が行われている。M-25MNTVCを採用しても、その制御則等が大きく変更しなくても良いように機体の特性を考慮してM-25MNTVCの帯域要求も同じ4Hzとした。

3.3.6. 精度

2段ミスアライメントの許容値として0.21°がシステム仕様であるため、TVCへの精度要求は0.1°を設定した。

3.3.7. ロック機能

1段飛翔中の加速度環境下において2段TVCノズルの揺動を抑える必要性から、M-34MNTVCのような機械式ロックと自らのサーボ特性を利用したサーボロック方式を比較して、後者のサーボロック方式を選定した。よって、1段点火前に、熱電値を起動してアクチュエータを作動させ、CPUからロックコマンドとして1段飛翔中に0V指令をアクチュエータに出し続けることとした。機械的なロック機能を削除したため、信頼性が向上している。

3.4. M-25TVC装置概要

M-25MNTVC装置は、モータ側ノズルホルダ部・多層積層構造（ゴム、金属）のフレキシブルジョイントを介し、組み付けられたノズルを電動モータ式サーボアクチュエータで偏向（最大5°）させ、推力方向を変えることによって制御モーメントを得る方式である。

ノズル廻りの艤装は、アクチュエータとリファレンスロッドをモータ側ノズルホルダとノズル側コンプライアンスリング間のピッチ、ヨー軸のそれぞれ対称位置に装着し、アクチュエータは機軸に対して大きな角度をもって艤装することで、燃焼初期の荷重を軽減させている。その他の機器としては、サーボアンプ、熱電池、APDP（電力分配器）もノズル廻りに艤装されている。

ノズル部のアライメント補償は、フレキシブルジョイントがモータの燃焼内圧により変形して推力軸にミスアライメントが生じるため、アクチュエータ及びリファレンスロッドにポテンシオメータを内蔵し、出力をサーボ系内部でフィードバックすることでバイアス量を補正している。

表－5にM-25MNTVC装置の仕様及び諸元を、図－5に装置概要を示す。

表－5 M-25MNTVC装置の仕様及び諸元

項 目	仕 様
TVC システム	可動ノズル TVC (MNTVC)
アクチュエータ	電動モータ式サーボアクチュエータ
電源	リチウム/アルミ合金系熱電池
諸 元	
TVC 制御帯域	4Hz 以上 ($\pm 0.1^\circ$ 駆動時)
最大舵角	5° 円
最大舵角速度	$16^\circ/\text{s}$ 以上 ($\pm 3^\circ$ 駆動時)
最大横推力	142.6kN (最大主推力 1636kN 時)
ノズル作動方向	ピッチ、ヨー方向及び合成方向
ジョイントスプリングトルク	$3.9 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 以下
TVC 固有振動数	10Hz 以上 ($\pm 0.1^\circ$ 駆動時)
モータ内圧によるノズル軸変位	12mm 以下 ($P_c = 11.75 \text{ MPa}$)

3.5. 構成品の概要

3.5.1. 電動アクチュエータ

電動アクチュエータは、3相DCブラシレス電動モータ、モータ回転角検出用レゾルバ、モータ回転を直線運動に変換するボールスクリュー、モータ～ボールスクリュー間の伝達減速ギア、ピストン位置検出用ポテンシオメータで構成される。以上により位置、速度、電流制御による駆動精度、動的応答特性を得ることができる。

表－6にM-25MNTVC装置構成品の諸元を示す。

3.5.2. 舵角補償用ポテンシオメータ

舵角補償用ポテンシオメータは、ピッチ、ヨー軸各々のアクチュエータの対称位置に搭載され、モータ内圧によるフレキシブルジョイントの変位及びノズル駆動に伴う推力軸のミスアライメントを補正する。これは、内蔵されるポテンシオメータの出力をサーボアンプにフィードバックして位置の補正を行う方式である。

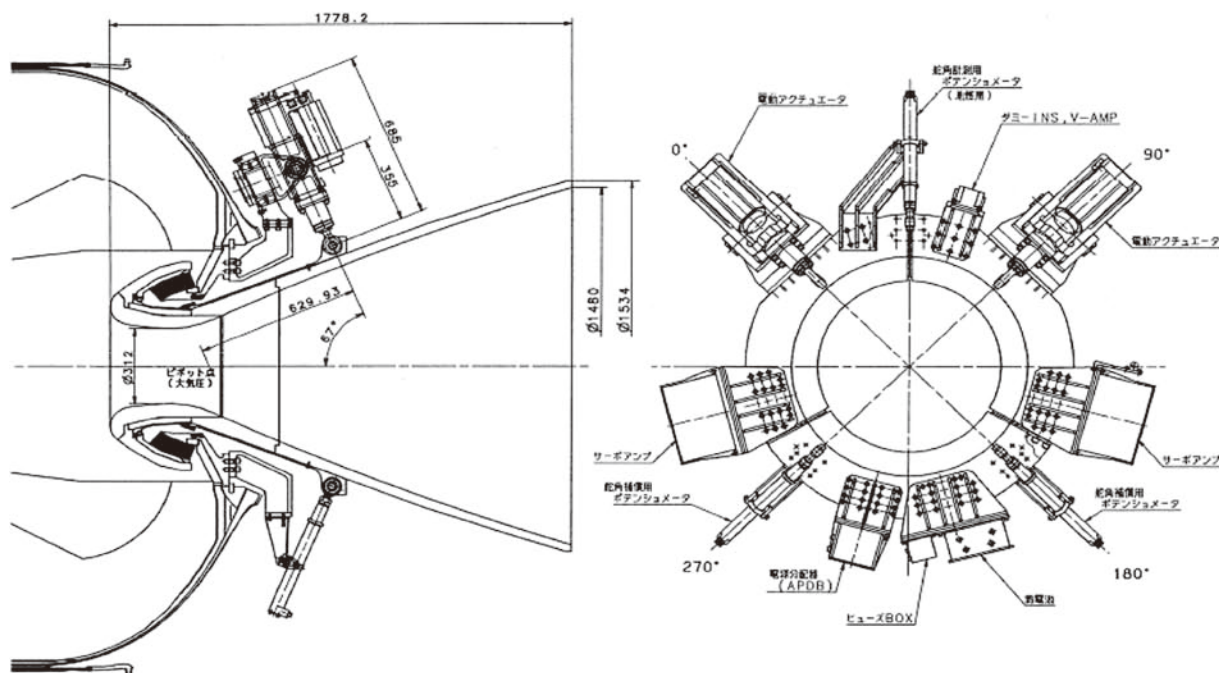


図-5 M-25MNTVC 装置概要

3.5.3. サーボアンプ

サーボアンプは、インバータ、制御回路、電源回路、ドライバ、EMI フィルタ、DC/DC コンバータ、判定回路、温度センサで構成される。

ストローク計測用ポテンシオメータ信号及び偏向角補償用ポテンシオメータ信号をフィードバックし、ノズル偏向指令信号をアクチュエータに出力することで精度の高い制御を可能にしている。その他としてアクチュエータのパワー回路機能を有している。

3.5.4. 電力分配器 (APDB)

電力分配器は、ダイオードモジュール、分圧抵抗、回生電流吸収回路、電源バスバーより構成される。単電池一本毎の活性化信号をモニタすると共に、各電池の電力を集約させ、アクチュエータに分配供給する。その他の機能として、アクチュエータがノズルに引き戻される際に発生する回生電流を電池に戻さずに消費する回路を有している。

3.5.5. 高性能リチウム/アルミ合金系熱電池

高性能リチウム/アルミ合金系熱電池は、点火スクイブ、導火剤、熱電池セルユニット（発熱体、+側電極、電解質、-側電極、集電板）断熱材、ケース、出力端子により構成される。

図-6に高性能リチウム/アルミ合金系熱電池の概要を示す。

本熱電池の起動は、下記の原理により発生させた電力をアクチュエータ駆動用電動モータに供給する。

- (1) 地上系熱電池点火装置の電力供給により熱電池内蔵の点火スクイブを発火させる。
- (2) 点火スクイブにより導火剤を燃焼させる。導火剤は規定の速度をもって火炎を伝播させ、積み上げられた158組のセルユニットのそれぞれの発熱体を燃焼させる。
- (3) 発熱体の燃焼により電解質を溶融させ、活性化させることで発電する。

3.5.6. 熱電池点火系

熱電池点火系は、鈍感型スクイブを使用する。下記に詳細を示す。

(1) 熱電池点火器構成

- ・ 単電池1本につき2ヶスクイブの冗長構成である。
- ・ 組電池は、単電池2本構成であるため、組電池1式につきスクイブ4ヶ使用する。

(2) スクイブ仕様

スクイブ単体仕様を以下に示す。

- ・ 入力インピーダンス： $1.1 \pm 0.2 \Omega$ （入力コネクタ端）
- ・ 最大不発火電流：①1.0A × 5min ②1.0W × 5min
- ・ 推奨発火電流：5.0 ～ 20.0A × 25ms 以上

(3) 電源系統

鈍感型スクイブのため、4系統（スクイブ）パラレル結線とする。よってトータルの発火電流は、20A 以上とする。

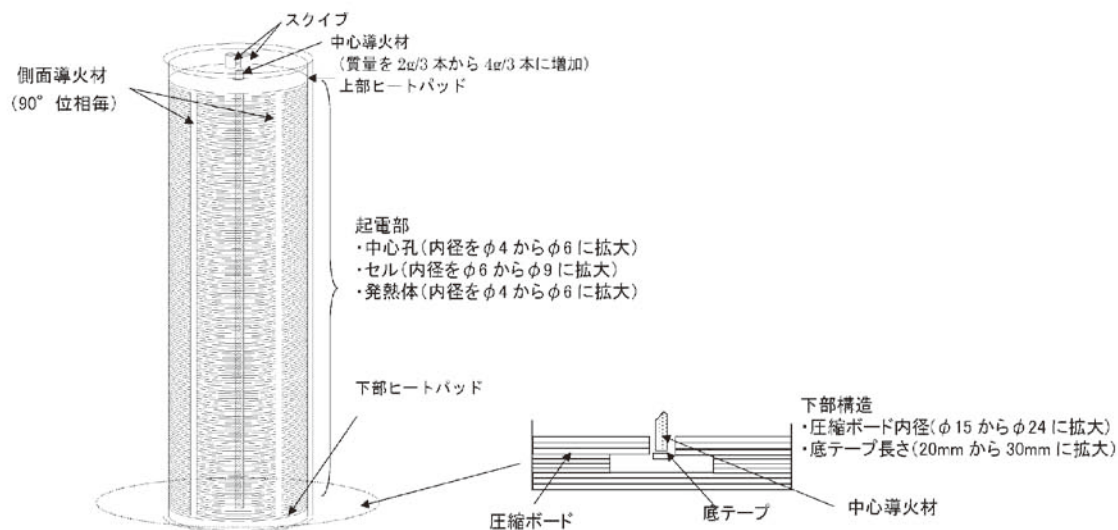


図-6 高性能リチウム/アルミ合金系熱電池の概要

表－6 M-25MNTVC 装置構成品の諸元

電動アクチュエータ	方式	DC ブラシレスモータ
	定格電圧	270V DC
	定格電流	105A
	定格ストローク	－71～＋90mm
	定格推力	80kN 以上
	最大速度	198mm/s 以上
	ストローク精度	±0.992mm 以下
	重量	104kg/2 ケ
ポテンショメータ	検出器	リニアポテンショメータ
	印加電圧	±10V DC
	定格ストローク	±100mm
	重量	7kg/2 ケ
サーボアンプ	方式	ソフトウェアサーボ方式
	CPU	DSP (デジタルシグナルプロセッサ)
	定格電圧	±28V DC
	消費電流	2A DC
	重量	54kg/2 ケ
熱電地	電池方式	リチウムアルミ合金負極熱電地
	出力電圧	245～305V DC
	容量	3876As 以上
	最大電流	184A×6s
	平均電流	23A
	重量	19kg
電流分配器 (APDB)	サーボアンプ出力	0～360V DC
	最大出力電流	130A
	クランプ動作電圧	315～360V DC
	最大回生電力	19kW
	回生時間	0.42s
	重量	17kg
ブラケット	アクチュエータ部剛性	1.6×10^7 N/m 以上
	重量	260.8kg

3.6. 開発試験（地上燃焼試験）結果

3.6.1. 制御特性

地上燃焼試験における制御特性は、ノズル位相 0° 、及び 90° 位置に取り付けられたアクチュエータにより 0° － 180° 及び 135° － 315° 方向にノズルを駆動させて、TVCアクチュエータの静特性、過渡特性、周波数特性、出力トルク性能を確認した。

表－7に地上燃焼試験、及びシステム試験で得られた結果を示す。

尚, 偏向角 θ [°] の推定には以下の式を用いた.

$$\theta = \left(Ef - \frac{Ef + Er}{2} \right) \times SF = \frac{Ef - Er}{2} \times SF$$

ここに, Ef , Er はそれぞれ偏向角を求める面内のアクチュエータ/ポテンショアンサ[V], SF はシステム試験静特性データの実舵角 θ と Ef , Er より得られるスケールファクタ [deg/V] である.

表-7 M-25MNTVC システム試験及び地上燃焼試験結果

特性項目	計測項目		規格 目標値	単位	試験結果					
					システム試験	燃焼前 チェック	燃焼試験	燃焼後 チェック		
静特性	0°	+5°コマンド時		±5±0.1° 以内	°	+5.034	+5.05 ^{*2}	+4.99	—	
	180°	−5°コマンド時				−5.055	−4.93 ^{*2}	—	—	
	90°	+5°コマンド時				+4.028 ^{*1}	+4.00 ^{*1, *2}	—	—	
	270°	−5°コマンド時				−5.005	−5.00 ^{*2}	—	—	
	135°	+5°コマンド時				+4.928	+5.03 ^{*3}	—	+5.02	
	315°	−5°コマンド時				−5.181	−4.95 ^{*3}	—	−4.97	
ステップ 応答特性	ACT1	最大速度	0°→+3° 0°→−3°	16°/s 以上	°/s	16.85	—	17.5 ^{*4}	—	
						18.04	—	18.4 ^{*5}	—	
	ACT2	最大速度				0°→+3°	16.81	—	18.4 ^{*5}	—
						0°→−3°	16.50	—	18.3 ^{*4}	—
周波数 応答特性	ACT1	0°±1.0°振幅		帯域 4Hz 以上	Hz	4.2	—	—	—	
	ACT2				Hz	4.1	—	—	—	
ノズル 駆動特性	スプリングトルク定数		3.9×10 ⁵ N・m/rad 以下	N・m/rad	3.0×10 ⁵	2.9×10 ⁵	3.1×10 ⁵	—		

*1 F/J 部計測ハーネス干渉のため+4°時

*2 ノズルシグトレ

*3 干渉チェック (1)

*4 135°-315°方向, +0.5°→+3.5°駆動時

*5 135°-315°方向, +0.5°→-2.5°駆動時

3.6.2. 燃焼立ち上がり特性

Pc バイアスに伴うノズルの最大偏向角は, 燃焼立ち上がり後, 約 0.28s で 0.18° (45°-225° 方向) を示し, その後, 約 0.3s で中立位置に安定しており, 燃焼立ち上がり時の偏向角補償機能, 及び制御遅れ時間の確認ができた.

ノズル軸の変位量は, 燃焼立ち上がり後, 約 0.4s で 8.4mm に安定しており, 規格の 12mm 以下を満足する結果が得られている.

3.6.3. 静特性

静特性データ取得の結果, 台形波駆動時の指令偏向角に対する偏向角精度は 0.02° で, 精度要求 0.1° を十分に満足しており, ノズル最大偏向角 ±5° におけるフレキシブルジョイントのスプリングトルク定数は約 3.2×10⁵ N・m/rad で, 要求仕様の 3.9×10⁵ N・m/rad 以下となり, これについても満足できる結果が得られた. 尚, 1 軸駆動によるアクチュエータ最大ストロークは 65.8mm で, 仕様 90mm に対するマージンが十分であることが確認された.

3.6.4. 動特性

動特性は、X + 0.7sでの $0^{\circ} \rightarrow +5^{\circ}$ ステップ、X + 19.0sでの $+0.5^{\circ} \rightarrow +3.5^{\circ}$ ステップ及びX + 27.0sの $+0.5^{\circ} \rightarrow -2.5^{\circ}$ ステップのコマンドによりノズル偏向角速度を取得した。いずれも $16^{\circ}/s$ の要求を満足する結果が得られている。

3.6.5. 周波数特性

周波数特性は、 $\pm 0.2^{\circ}$ 、及び $\pm 1.0^{\circ}$ 正弦波コマンドによりノズル応答データを取得した。また、システム試験との比較を行い、いずれの特性もシステム試験と同等以上の性能であることを確認した。

3.6.6. モータ着火時アクチュエータ荷重

モータ着火時のアクチュエータ荷重は、温度の影響と思われる温度ドリフトが発生しているため、これを補正した後に荷重換算結果を求めた。

歪荷重換算結果によると、アクチュエータ軸荷重は、ACT1側で最大値25.2kN (X + 0.15s, 圧縮)、ACT2側で最大値11.5kN (X + 0.23s, 圧縮)であった。これらの荷重は、アクチュエータ耐荷重要求98kN (10tonf) 以下であるため、問題ない結果であった。燃焼初期ごく短時間の本結果は、ドリフトの影響が無視できるため補正はしていない。

3.6.7. 熱環境条件（温度計測）

すべての計測点において、モータ燃焼中の温度上昇が見られるが、局所的に急激な温度上昇がみられる。この急激な温度上昇に関しては、ノズル駆動コマンドパターンに合わせ、なおかつこの過渡状態でのみ現れていることから考えて、TVC系より生ずるノイズの影響であると判断している。

3.7. フライト結果

M-25MNTVC装置の5～8号機におけるノズル偏向角履歴、燃焼初期応答、制御開始時ノズル過渡応答、Pc (M-25モータ内圧)バイアス推定量、アクチュエータ駆動電源特性は、すべてにおいて良好な結果が得られた。

3.7.1. ノズル偏向角履歴

ノズル偏向角履歴は、すべての機体において指令ノズル偏向角に対する応答ノズル偏向角の履歴に異常はなく、指令に対する応答の偏向角誤差も過渡応答時を除き、要求値 $\pm 0.1^{\circ}$ 以内を満足する結果となった。

図-7-1～3にM-25MNTVCノズルの偏向角履歴（6号機）を示す。

3.7.2. 燃焼初期応答

モータ着火時のノズル応答については、該当秒時のテレメータデータが取得出来ておらず、詳細解析不可であったが、X + 76.5s以降のTVC応答履歴、及び以下のアクチュエータ軸荷重データ（メモリデータ）より、地上燃焼試験及び全フライトデータと同様の結果であったため、問題はなかったものと推測できる。

アクチュエータへの着火衝撃荷重は、19.6kN以下と推定され、アクチュエータの許容荷重98kNを充分下回る結果であった。

3.7.3. 制御開始時ノズル過渡応答

制御開始時のノズル過渡応答については、該当秒時のテレメータデータが取得出来ておらず、詳細解析不可であったが、上記初期応答と同様、X + 76.5s以降のTVC応答履歴、及びアクチュエータ軸荷重データ（メモリデータ）より、地上燃焼試験及び全フライトデータと同様の結果であったため、問題はなかったものと推測できる。図-8-1, 2に制御開始時のアクチュエータ軸荷重結果（6号機）を示す。

3.7.4. Pcバイアス推定量

アクチュエータアンサ、及びポテンシオメータアンサより推定されるPcバイアス量は、モータ内圧立ち上がり初期において約8mm、最大内圧11MPaAで約10mmであった。この量についても地上燃焼試験及び全フライトデータと同等であり、F/Jが正常であることを示している。

3.7.5. アクチュエータ駆動電源特性

アクチュエータ駆動用電源モニタ結果によると、電源電圧と電流の履歴に異常はなく、定電流放電の履歴を示していることから、電源は正常に機能したと判断できる。熱電池点火時の電圧立ち上がり特性は、起動時間要求 255V/400ms 以内に対して 278ms であり、正常な立ち上がり特性を示した。

図-9 に M-25MNTVC アクチュエータ駆動電源（熱電池）の立ち上がり特性（6号機）を示す。

以上の機能は、全フライトにおいて正常であった。ここでは6号機の各種データ（図-7-1～3, 図-8-1, 2, 図-9）をもって TVC の各種機能の健全性をご確認頂きたい。表-8 には、フライトにおける M-25MNTVC の 5～8号機の TVC 性能を示す。

表-8 M-25MNTVC 5～8号機 TVC 性能

		M-V-5	M-V-6	M-V-7	M-V-8
TVC 性能	最大偏向角	0.2° (Norm)	0.2° (Norm)	0.67° (Norm)	0.3° (Norm)
	偏向角誤差	±0.1°以内	±0.1°以内	±0.1°以内	±0.1°以内
電源特性	最大（初期）	290V	285V	281V	281V
	最小（終期）	273V	277V	277V	277V
F/J 特性	Pc バイアス量 (J/H 変形分含む)	約 10mm @11MPaA	約 10mm @11MPaA	約 10mm @11MPaA	約 10mm @11MPaA

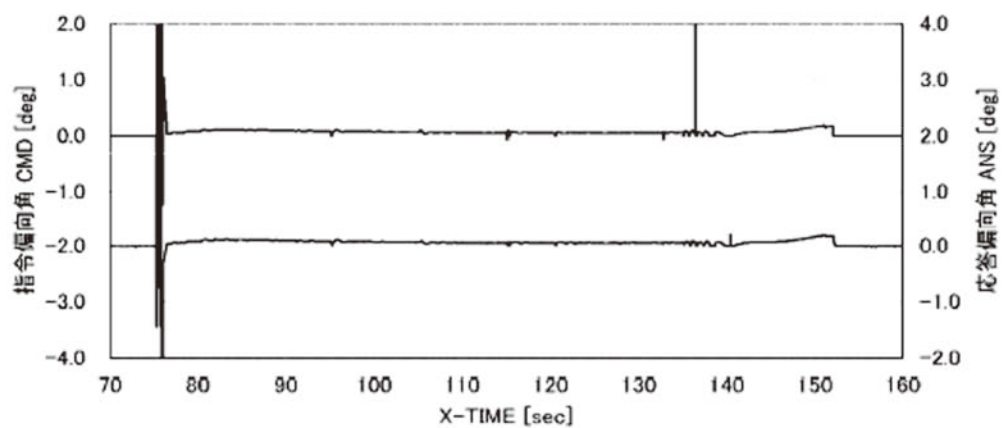


図-7-1 M-25MNTVC ノズル偏向角履歴 (Pitch)

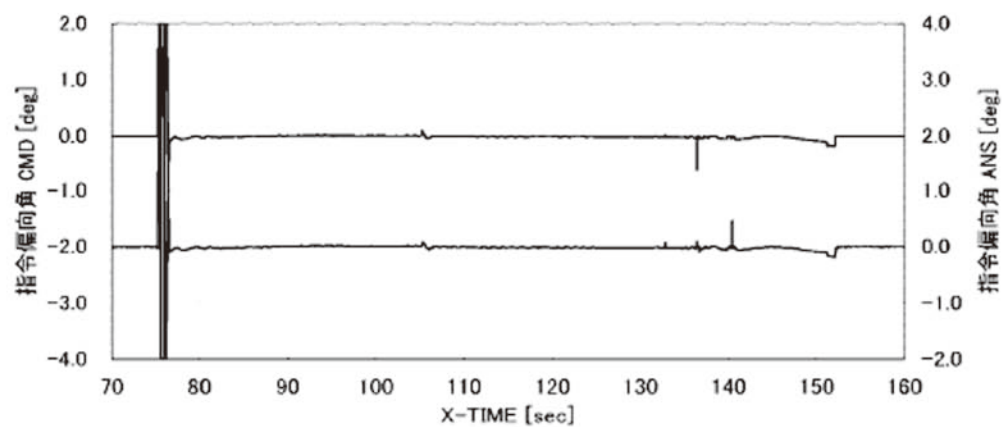


図-7-2 M-25MNTVC ノズル偏向角履歴 (Yaw)

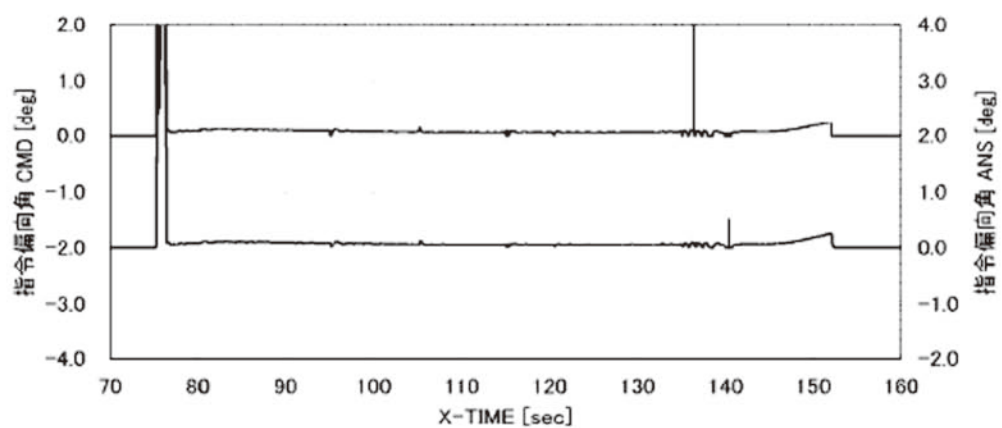


図-7-3 M-25MNTVC ノズル偏向角履歴 (Norm)

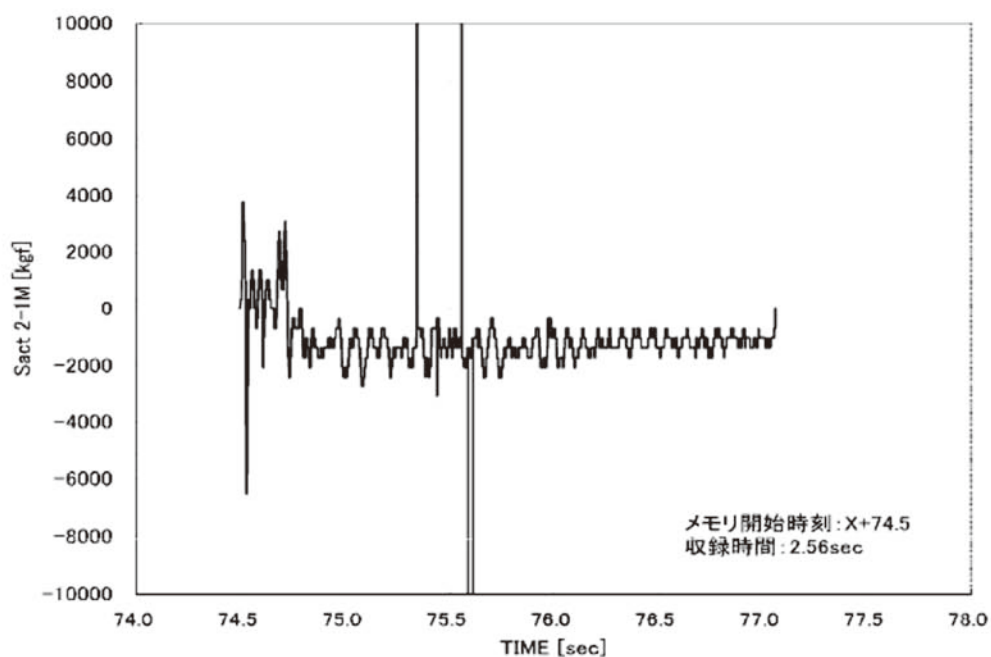


図-8-1 M-25アクチュエータ軸荷重 (Pitch)

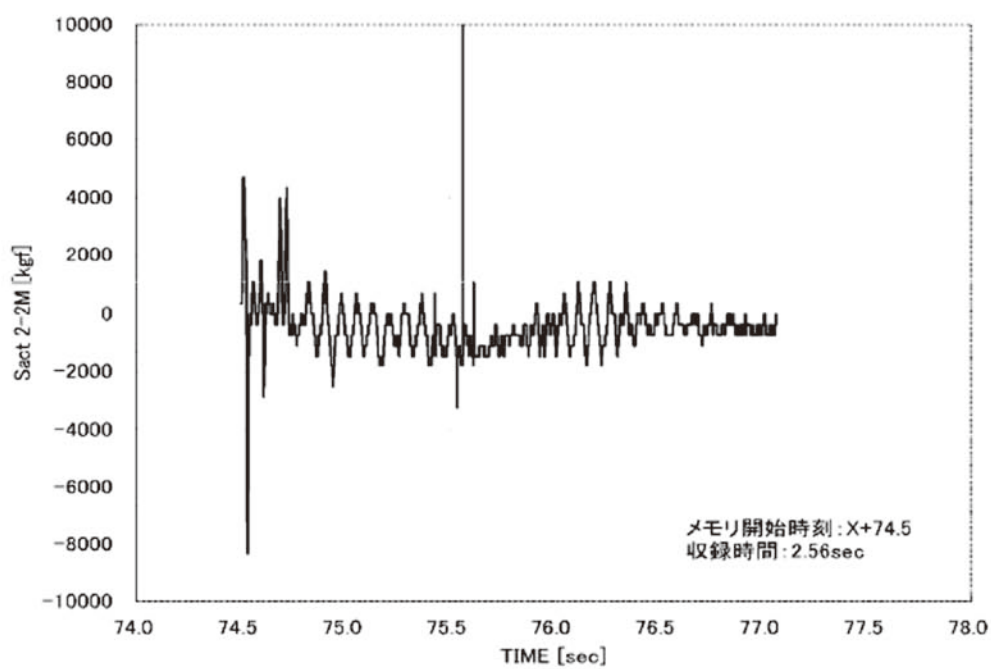
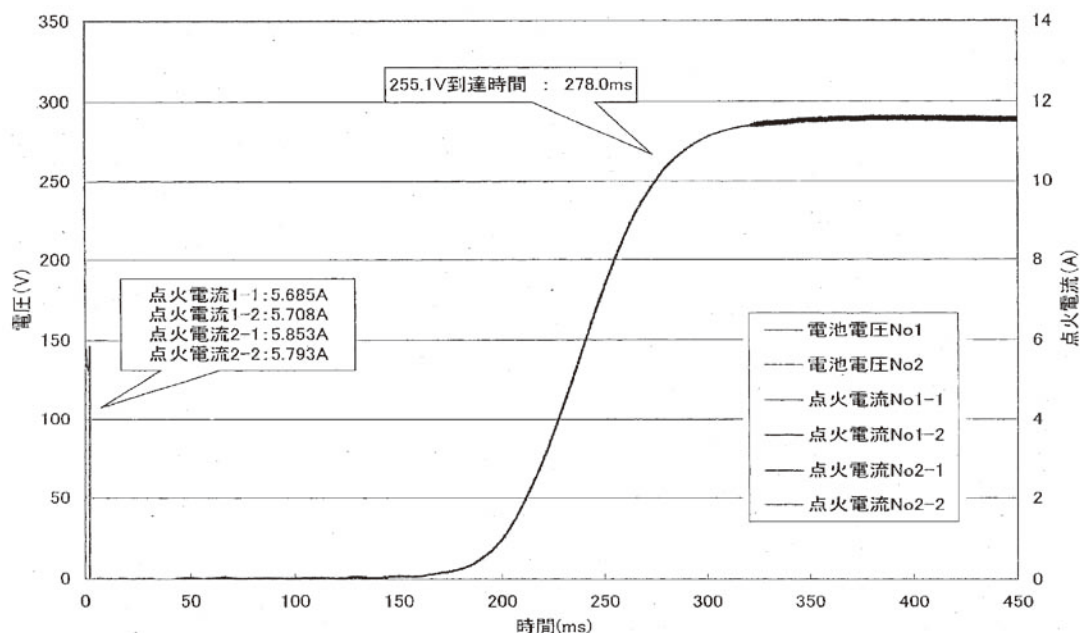


図-8-2 M-25アクチュエータ軸荷重 (Yaw)



図－9 M-25MNTVC アクチュエータ駆動電源（熱電池）立ち上がり特性

4. M-34（第3段）MNTVC装置

M-V 第3段の制御装置は、上段ステージの軌道投入精度の向上のため、3軸姿勢制御を導入している。これによりパーキング軌道上でのマヌーバビリティを飛躍的に向上させている。第3段燃焼中のピッチ/ヨー軸の姿勢制御装置は、必要とする制御力が小さく、ノズル重量が250kgと比較的軽量であるため、電気サーボモータ駆動方式のM-34MNTVCを採用している。

M-34MNTVC装置は、モータ側ノズルホルダ部・多層積層構造（ゴム、金属）のフレキシブルジョイントを介し、組み付けられたノズルを電動モータ式サーボアクチュエータで偏向（最大1°）させ、推力方向を変えることによって制御モーメントを得る方式である。

機器の構成は、サーボアンプ、電動アクチュエータ、電池（5号機は酸化銀電池、6、7、8号機はリチウムイオン電池）から成り、B3_I/Oパッケージに接続される。サーボアンプと電池はB3PLに搭載する。アクチュエータは、M-34モータ側ジョイントホルダとノズルコンプライアンスリング間に搭載し、その対称位置にはリファレンスロッドを搭載する。モータ内圧によるフレキシブルジョイントの変形には、各アクチュエータ対称位置のリファレンスロッドに内蔵されているポテンシオメータの出力をサーボ系内部でフィードバックすることでバイアス量を補正し、ノズルの偏向角誤差を0.02°以内に抑える。

6号機からの変更点は、

- (1) アクチュエータ駆動用電源が酸化銀電池からリチウムイオン電池に変更。
- (2) ポテンシオメータのストローク余裕の改善。

以上の詳細は後項を参照願いたい。

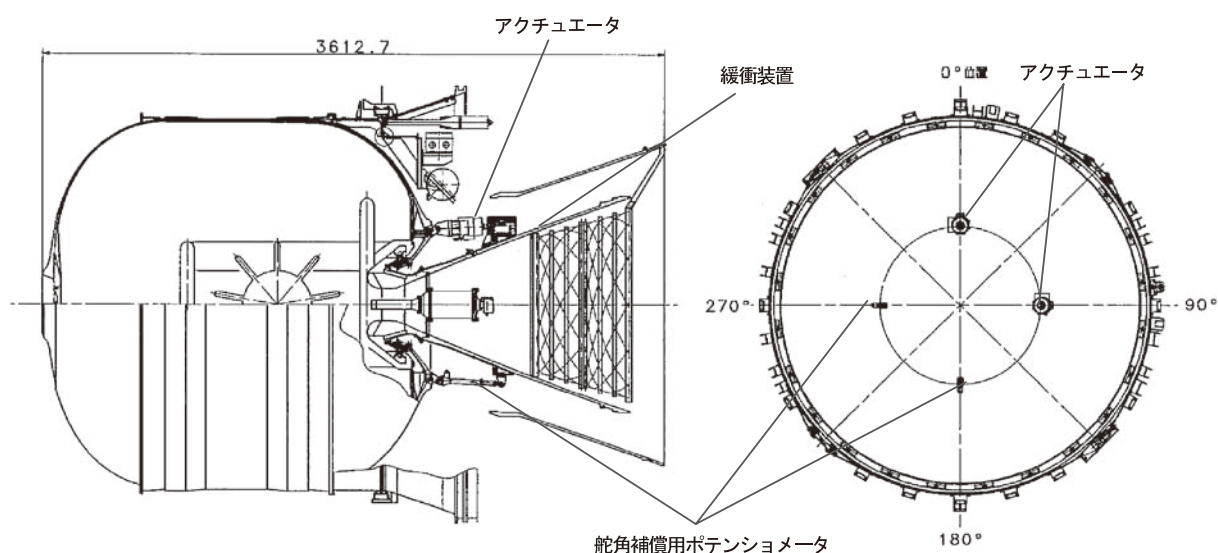
3段飛翔中の制御は、空気の影響を無視できるため、推力ミスアライメント1/200（機体の重心オフセットを等価的に含んだ値）及び衛星部重心オフセット5mmを考慮して3段の制御力を設定した。フライトシミュレーションの結果、過渡的な最大迎角は0.7°、定常的なトリム舵角は0.5°である。バンド幅1Hzについては、3段飛翔中は大きな外乱がないため、この程度で充分であることをシミュレーションで確認している。

表－9にM-34MNTVC装置の仕様及び諸元を、図－10に装置概要図を示す。

尚、開発経緯及び開発試験の詳細は、「宇宙科学研究所報告 特集 第47号、M-V型ロケット（1号機から4号機まで）」を参照願いたい。

表－9 M-34MNTVC 装置仕様及び諸元

項 目	仕 様
TVC システム	可動ノズル TVC (MNTVC)
アクチュエータ	電動モータ式サーボアクチュエータ
電源	酸化銀バッテリー電池
諸 元	
TVC 制御帯域	1Hz 以上[伸展ノズル有り] (伸展ノズル付で $\pm 0.7^\circ$ 駆動時)
最大舵角	1° 円
最大舵角速度	$4.4^\circ/\text{s}$ 以上 (伸展ノズル付で $\pm 0.7^\circ$ 駆動時)
最大横推力	6.02kN (最大主推力 345kN 時)
ノズル作動方向	ピッチ, ヨー方向及び合成方向
ジョイントスプリングトルク	$1.67 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 以下 ($P_c=5.88\text{MPa}$, 舵角 1°)
TVC 固有振動数	10Hz 以上 (伸展ノズル付で $\pm 0.05^\circ$ 駆動時)
モータ内圧によるノズル軸変位	8.3mm 以下[フレキシブルジョイント単体] ($P_c=5.88\text{MPa}$)
衝撃緩衝機能	アクチュエータ荷重 (24.5kN 以下)



図－10 M-34MNTVC 装置概要

4.1. 構成品の概要

4.1.1. 電動リニアアクチュエータ

本アクチュエータは、3相のDCブラシレスモータの回転を直線運動に変換するボールスクリュウ、回転角を検出するレゾルバ、初期角度位置を検出するリニアポテンショメータ、ハウジング及び1, 2段飛翔中のノズルの揺れを防止するロック機構から成り、位置、速度、電流の制御はソフトウェアサーボ方式を採用している。電動アクチュエータの採用により、軽量で高性能の制御が可能となった。

表－10にM-34MNTVC装置構成品の諸元（5号機）を示す。

表－10 M-34MNTVC装置構成品の諸元

電動アクチュエータ	方式	DC ブラシレスモータ
	定格電圧	28V DC
	定格電流	40A
	定格ストローク	－8.4～＋18.4mm
	定格推力	9.38kN
	最大速度	56.3mm/s（無負荷）
	精度	±0.1mm 以下
サーボアンプ	方式	ソフトウェアサーボ方式（制御演算方式）
	CPU	DSP（デジタルシグナルプロセッサ）
	定格電圧	±18V DC
	消費電流	0.6A DC
ポテンショメータ	検出器	リニアポテンショメータ
	印加電圧	±10V DC
	定格ストローク	±30mm
電池	種類	酸化銀電池
	容量	2.2Ah
	最大電流	88A×2s
	平均電流	52A 以上

4.1.2. 舵角補償用ポテンショメータ

舵角補償用ポテンショメータは、M-3S II型SB-735用のポテンショメータと同様の構造、機能を有しており、定格ストロークは±30mmである。

本ポテンショメータは、アクチュエータとノズル軸の対称位置にそれぞれ配置され、モータ内圧等によるノズル舵角変動を補正するため、ストローク信号がサーボアンプにフィードバックされる。

6号機におけるポテンショメータのストロークは、5号機飛翔前の解析評価結果により、信頼向上のための改修を実施した。

経緯は、5号機飛翔前においてM-34モータ着火時のPcバイアスの影響によるTVCポテンショメータ推定最大ストロークの追加解析を実施した。結果は、ポテンショメータ仕様±30mmに対して＋側が28.3mmとなった。この数値はすべての危険モードを積み重ねた最悪値（これを安全率1と定義）であることと、飛翔直前における改修のリスクを考え合わせ、5号機では現行のままとした。

6号機においては、5号機での飛翔前検証及び飛翔結果により問題のないことが確認されたが、TVC各種の設計思想である安全率1.2倍以上の数値をもって、信頼性向上のための改修を実施した。改修内容は、現行のポテンシオメータストロークを変更せず、サーボアンプのソフト上における中立点オフセット（全ストロークの配分を変える）対応が最適であることから本方式を選択した。

『変更内容』

【改修前】 入力電圧： $\pm 28\text{mm}/\pm 10\text{V}$

【改修後】 入力電圧： $+ 33.6\text{mm} \sim 0\text{mm}/10\text{V} \sim - 2\text{V}$
 $0\text{mm} \sim - 22.4\text{mm}/- 2\text{V} \sim - 10\text{V}$

『ソフトウェア』

【改修前】 $\pm 28\text{mm}/\pm 5\text{V}$

【改修後】 $+ 33.6\text{mm} \sim 0\text{mm}/+ 5\text{V} \sim - 1\text{V}$
 $0\text{mm} \sim - 22.4\text{mm}/- 1\text{V} \sim - 5\text{V}$

電氣的ストローク： $33.6\text{mm} \cdot 22.4\text{mm}$ ，マージン：5.6mm（1.2倍）

機械的ストローク： $35.6\text{mm} \cdot 24.4\text{mm}$ ，マージン：7.6mm（1.27倍）

以上、設計思想に基づいた機械的ストロークの安全率1.27倍が確保された。

改修後の確認については、M-34MNTVC装置のシステム試験、噛み合わせ試験、USCにおける第1、第2組立オペレーション及びフライトオペレーションの駆動試験において問題のないことを確認した後、フライトに臨んだ。

4.1.3. サーボアンプ

サーボアンプは、CPUとして高速のDSP（Digital Signal Processor）チップを採用しているため、従来の位置制御及び速度制御ループに加えて電流制御ループもソフトウェアサーボ化している。以上の方式により電流制御用基板が削減できるため、軽量化になっている。また、各種異常検出機能をもつことでソフトウェアの信頼性の向上を図っている。

モータ内圧等によるノズル舵角変動を補償するため、舵角補償用ポテンシオメータからの信号をフィードバックする機能も有している。

サーボアンプは、ピッチ、ヨーのアクチュエータに1基ずつ、計2基用意されている。

4.1.4. 駆動用電源（酸化銀電池及び高性能リチウムイオン電池）

酸化銀電池は、電動リニアアクチュエータ駆動用電源として1個搭載される。この電源は、ロック機構用としても使用する。

酸化銀電池は、SB-735用の酸化銀電池を応用したもので、必要容量の低下に伴って小型化のセルYAS-4、5を新規開発した。新たに耐振動環境用として、内部に防振用ゴムを用いた。従来の水素吸収剤については、水素置換用の注排気バルブに変更することで小型軽量化を図っている。

リチウムイオン電池は、高性能・小型軽量化・低価格化の観点から、酸化銀電池に替わって6号機から採用を決めたものである。図-11にリチウムイオン電池概要を示す。

(1) セル

電池セルは、HEV（Hybrid-EV）用リチウムイオン電池で、概要を以下に示す。

- ① 型式番号 : IMA6
- ② 製造元 : 新神戸電機(株)
- ③ 寸法 : $\phi 40 \times 108$
- ④ 質量 : 0.3kg
- ⑤ 定格容量 : 6Ah
- ⑥ 最大電流 : 88A

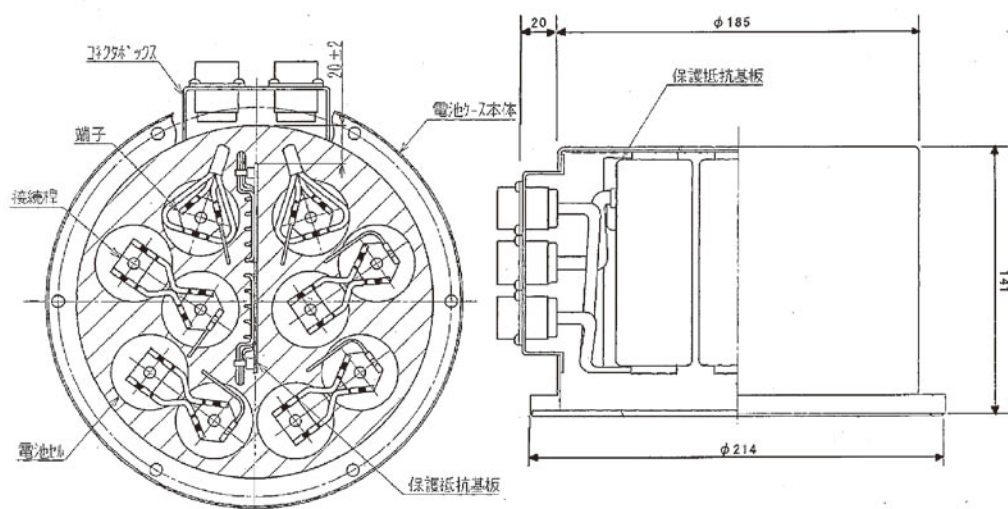


図-11 リチウムイオン電池概要

(2) 組電池

組電池は、M-V 集中電源と同構造（アセンブリも集中電源製造メーカーであるGSユアサにて実施）とした。概要を以下に示す。

- ① 寸法 : $\phi 214 \times 141$
- ② 質量 : 5.92kg（規格6.36kg以下：本体5.26kg + 取付アダプタ 1.1kg）
- ③ 使用セル数 : 10セル直列

(3) 電気的特性

- ① 放電温度 : 0℃
- ② 注液後経過年数 : 2年
- ③ 充電放置期間 : 14日@25℃
- ④ 充放電装置電圧モニタ誤算 : 20mV（ $\pm 10\text{mV}$ ）
- ⑤ 回生時の電池電圧 : 43.7V『電池要求上限電圧45Vを満足する』

(4) 開発試験

- ① 高率放電試験
- ② 環境試験（振動，衝撃，温度，真空）
- ③ 低温放電試験
- ④ 充電放置試験

M-34駆動用電池開発に供したセル数は、57セルを環境試験に、組電池相当のセル集合（10セル）をアクチュエータ組み合わせ試験に供した。

尚，開発試験において計2回の不具合が発生したが，対策としてはケース，セルの変更及び衝撃条件を見直すことで解決に至っている。表-11に不具合内容，対策の概要を示す。

(5) 製造工程

セルの製造工程は，自動車搭載品として9,600セルにおいてクレームはなく，変更が生じた場合には速やかに通知することになっている。

尚，セパレータの巻き数の変更については，巻き取り機の設定（プログラミング）変更のみであるため，実績を損なうものではないと判断している。

製造メーカでは、上記の工程後、健全性確認として充放電試験、充電放置試験を実施している。セルの受け入れ後は、バッチ毎に振動、衝撃試験を実施している。

(6) リチウムイオン組電池とアクチュエータ

目的：本電池を用いてM-34アクチュエータを駆動させて適合性試験を実施した。

結果：本電池を満充電状態から放電終止電圧までSOC約4%毎にアクチュエータを最大ステップ動作させ、電圧、電流、各セル温度を計測した。

その結果、アクチュエータ動作中の電圧、電流に異常はなく、前後の充放電特性も良好であった。また、メーカにて2年程度保管されたにも関わらず、出力抵抗に劣化はなく、新品に匹敵する値となった。詳細としては、構成セルの最小電圧が2.7Vとなるまでに31回のアクチュエータ最大ストローク動作、計27分の5Ω定抵抗放電を実施することができた。この時点までの放電容量の合計は、3.44Ah、充放電高率88.7%であり、アクチュエータ動作時電池放電が高率パルス放電となること、試験前後の低率放電容量、充放電高率を考えると妥当な値といえる。本電池電圧、電流より算出したアクチュエータ回生電力は、最大130Wであった。これは設定されたワーストケース値250Wより十分小さい値であることから、良好な結果といえる。

以上、すべてにおいて良好な結果が得られたため、本電池セルの使用において問題はないと判断した。

表－11 M-34MNTVC駆動用リチウムイオン電池開発における不具合及びその対策

発生事象	原因	対策
PM1 衝撃試験でケース上面のボルト接触部が変形	ケース強度不足	<ul style="list-style-type: none"> ・ケース材料を A50 から A20 に変更 ・本体取付ボルト用穴を本体貫通式からフランジ形式に変更（本体下部にフランジ追加）
PM1の対策を施したPM2にて衝撃試験を実施した結果、1セルに電圧低下が発生。分解の結果、セル最外周の負極活物質の脱落が判明	ケース剛性を向上させたことによるセルへの過負荷	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃条件の見直し ・セルセパレータを延長し、セル最外周の捲回力を向上させる

4.1.5. 衝撃緩衝装置

衝撃緩衝装置は、ノズルのコンプライアンスリング部とアクチュエータ軸の間に装着され、イグナイタ吹き抜け時のアクチュエータ軸に加わる衝撃荷重を低減させる機能を有している。衝撃の緩衝方法は、皿バネ方式を採用しており、これにより小型軽量化が図られている。機能としては、14.7kN以上の荷重が加わることで、皿バネが変位して衝撃を吸収し、TVC制御中の7.84kN以下の荷重では、作動しないようになっている。

4.2. フライト結果

M-34MNTVC装置の5～8号機におけるノズル偏向角履歴、燃焼初期応答、制御開始時ノズル過渡応答、Pc（M-34モータ内圧）バイアス推定量、アクチュエータロック機構、アクチュエータ駆動電源特性は、すべてにおいて良好な結果が得られた。

4.2.1. ノズル偏向角履歴

ノズル偏向角履歴は、すべての機体において指令ノズル偏向角に対する応答ノズル偏向角の履歴に異常はなく、指令に対する応答の偏向角誤差も過渡応答時を除き、要求値 $\pm 0.04^\circ$ 以内を満足する結果となった。

図－12－1～3にM-34MNTVCノズルの偏向角履歴（6号機）を示す。

4.2.2. 燃焼初期応答

モータ着火時のノズル応答については、モータ着火に伴うPcバイアスにより発生するノズル最大偏向角がピッチ、ヨーともに -0.8° 程度であり、約0.3sで再度中立位置に安定している。本結果は、地上燃焼試験及び全フライトデータと同等で、モータ内圧立ち上がり時のノズル軸変位に対し、ポテンシオフィードバックによる偏向角補償機能が正常に機能したことを示している。

アクチュエータへの着火衝撃は、アクチュエータロッドエンド部に貼り付けた歪ゲージ出力データによると、2tonf以下と推定され、アクチュエータの許容荷重3.9tonfを充分下回る結果であった。またモータ着火時及び制御開始時の応答履歴より得られるリファレンスポテンシオメータのストローク換算結果の最大値は、17mm以下で、ストローク最大値に対し十分な余裕がある結果であった。

4.2.3. 制御開始時ノズル過渡応答

ピッチ側/ヨー側の約 $+0.4^{\circ}$ /約 $+0.6^{\circ}$ の指令偏向角に対するノズル応答速度は、共に $8^{\circ}/s$ 程度であり、要求値： $4.4^{\circ}/s$ 以上を満足する結果が得られている。

図-13-1～2に制御開始時のノズル過渡応答結果（6号機）を示す。

4.2.4. Pcバイアス推定量

アクチュエータアンサ、及びポテンシオメータアンサより推定されるPcバイアス量は、最大内圧5.7MPaAで約11mmであった。この値は、地上燃焼試験及び全フライトデータと同等の結果であり、F/Jが正常であったことを示している。

4.2.5. アクチュエータロック機能

アクチュエータロック機能は、解除から再ロックまでの全工程の秒時において問題はなく、電源モニタについても異常な電流がないことから、ロック機能は正常に動作したと判断できる。

4.2.6. アクチュエータ駆動電源特性

電源電圧と電流の履歴に異常はなく、定電流放電の履歴を示していることから、電源は正常に機能したと判断している。

以上の機能は、全フライトにおいて正常であった。ここでは6号機の各種データ（図-12-1, 2, 図-13-1, 2）をもってTVCの各種機能の健全性をご確認頂きたい。表-12には、フライトにおけるM-34MNTVCの5～8号機のTVC性能を示す。

表-12 M-34MNTVC 5～8号機TVC性能

		M-V-5	M-V-6	M-V-7	M-V-8
TV 性能	最大偏向角	0.7° (Norm)	0.7° (Norm)	0.36° (Norm)	0.41° (Norm)
	偏向角誤差	±0.04°以内	±0.04°以内	±0.04°以内	±0.04°以内
	最大駆動速度	6.2°/s (P) 6.2°/s (Y)	8.0°/s (P) 8.0°/s (Y)	6.9°/s (P) 7.0°/s (Y)	— 7.6°/s (Y)
電源特性	最大（初期）	38.7V	42.0V	41.8V	41.4V
	最小（終期）	37.9V	41.5V	41.4V	41.0V
F/J 特性	Pc バイアス量 (J/H 変形分含む)	約 11mm @5.6MPaA	約 11mm @5.7MPaA	約 11mm @5.6MPaA	約 11mm @5.7MPaA

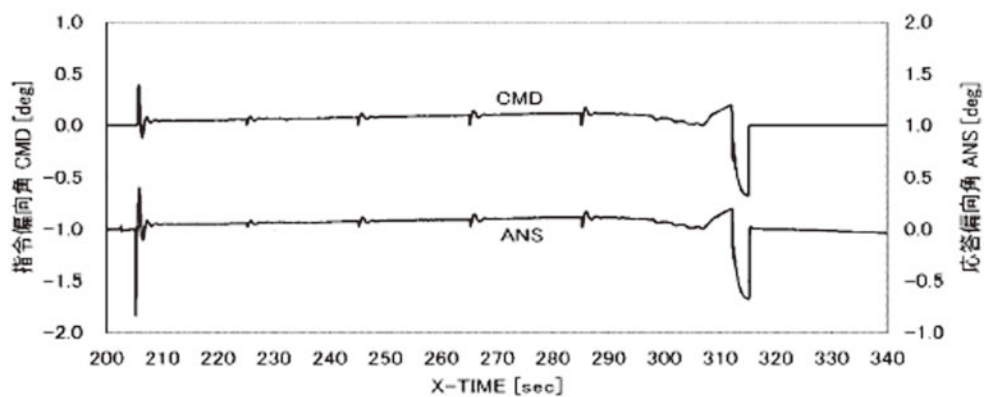


図-12-1 M-34MNTVC ノズル偏向角履歴 (Pitch)

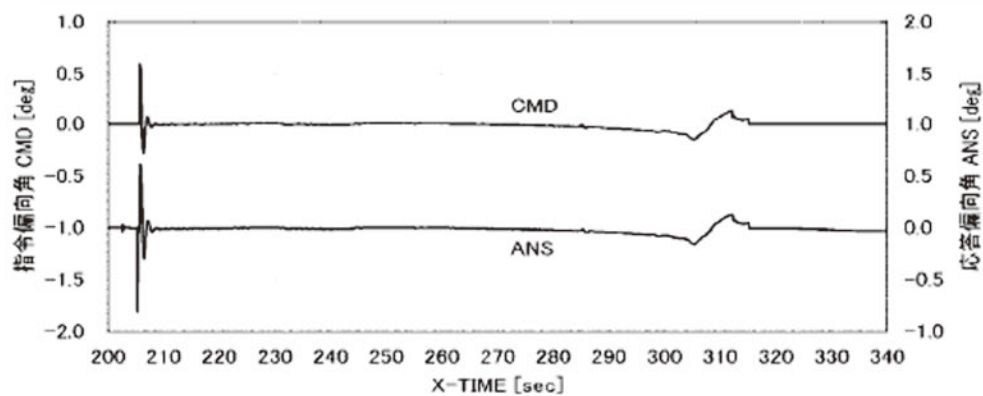


図-12-2 M-34MNTVC ノズル偏向角履歴 (Yaw)

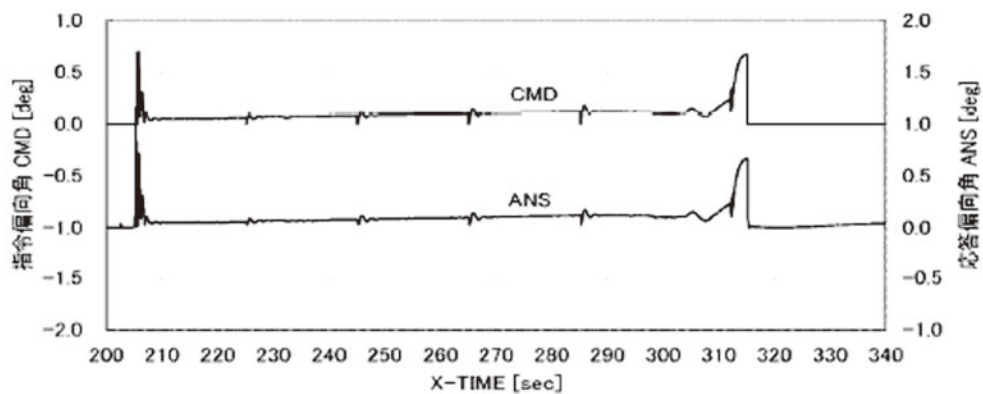


図-12-3 M-34MNTVC ノズル偏向角履歴 (Norm)

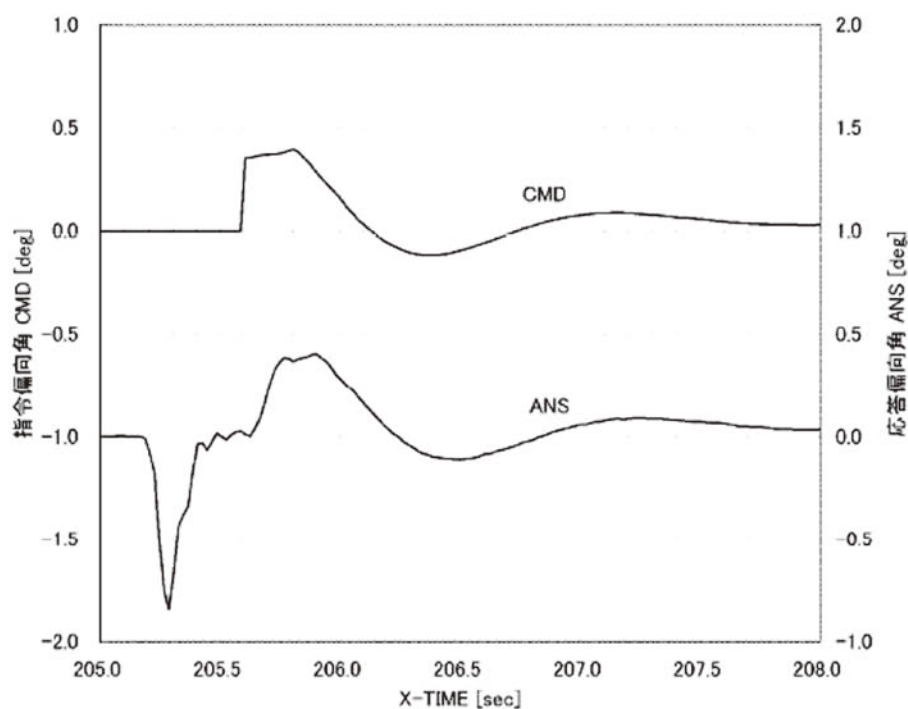


図 13-1 M-34MNTVC 制御開始時応答特性 (Pitch)

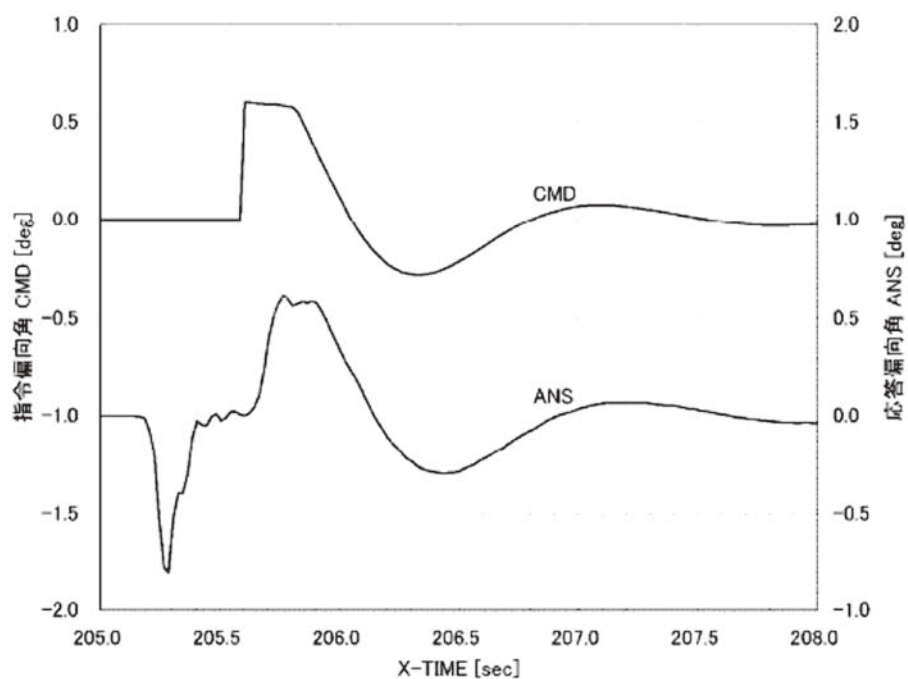


図 13-2 M-34MNTVC 制御開始時応答特性 (Yaw)

5. 第1段SMRC, 第2段SMRC, SMSJ装置

第1段ロール, 第2段ロール・3軸 (第2段モータ燃焼終了後)の制御装置は, M-3S II型で用いられていた従来型のSMRCに若干の改良を加えた同一推力/構成のものを採用し, M-Vロケットでは4号機までの使用実績がある。

4号機からの変更点は, 第1段SMRCの基数の削減化 (16基→4基), それに伴うカウリングの変更 (第2段SMRCと同形状に)と第2段SMSJの取付位置の変更 (第2段ノズル外壁から1/2段接手外壁), それに伴う新規設計のカウリングの追加である。第1段SMRCの削減化については, ロールレート分散解析を実施し, 4基においても制御系の要求である $30^{\circ}/s$ 以下を十分に満足することが確認され, カウリングの空力, 構造, 熱解析についても要求を満足するものであった。第2段のSMSJは, 取付位置変更に向けて実施した制御系解析の結果, 要求を満足しており, 追加のカウリングについてはSMSJの搭載方法がショックマウント取り付け構造になっているため, 第2段SMRCのものより若干 (横幅, 高さ共) 大きくなっている。これについても空力ほか各種解析の結果, 要求を満足するものであった。以上, すべての変更について問題のないことが確認されたため, 本方針により臨んだ。

第1段SMRC装置の制御は, ロケットにロール誤差が生じると, 姿勢制御電子部でこれを検出し, 同電子部からの制御信号でSMRC装置のフラッパー駆動用ソレノイドに電力が供給される。これによりフラッパーは片側に引き寄せられ, 固体推進薬ガスジェネレータの燃焼ガスがロール誤差を修正する方向に噴射することで制御トルクが生じ, ロケットのロール角が修正される。第2段SMRC装置は第2段モータ燃焼中のロール誤差を修正する。第2段SMSJ装置は第2段モータ燃焼終了後の3軸姿勢制御と, 第3段打ち出し方向への指向制御 (リファレンスチェンジ)を行うために使用する。

SMRC, SMSJ装置は, ポリブタジェン系の固体ガスジェネレータ, ソレノイド駆動方式のフラッパー弁型ホットガスバルブ (HGV) 及びドライバ装置からなり, 推力は200Nである。ガスジェネレータについては従来通りにHGV圧力と干渉のない1次スロットを設ける。

表-13に仕様及び諸元を, 図-14に第1段SMRC, 第2段SMRC, SMSJ装置概要を示す。

尚, 開発経緯, 開発試験の詳細は, 「宇宙科学研究所報告 特集 第47号, M-V型ロケット (1号機から4号機まで)」を参照願いたい。

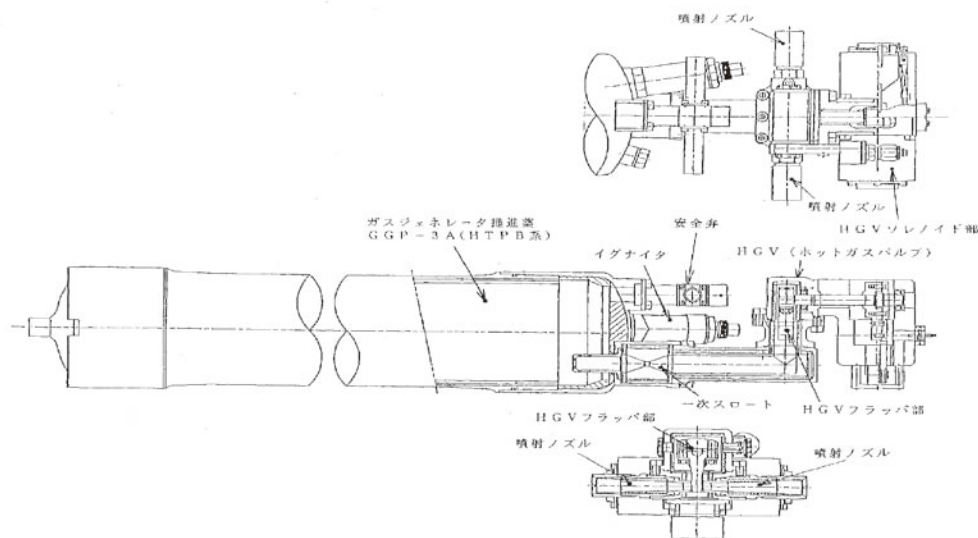


図-14 第1段SMRC, 第2段SMRC, SMSJ装置概要

表－13 第1段 SMRC，第2段 SMRC，SMSJ装置の仕様及び諸元

諸 元	
推力	196.1N (147.1N 以上) [1 基]
中立点推力アンバランス	0±19.6N
燃焼時間	75s 以上 (0～40℃)
応答遅れ	200ms 以下
HGV 最低作動圧	2.45MPa
HGV 最低作動電圧	22V (22～34V)
ドライバ仕様	
出力電圧	22.85～34V (負荷 : 22.7～31.1Ω/コイル)
供給電圧	22.85～34V
消費電流	15.3A 以下 (HGV8 基分)

SMRC，SMSJのサイジングについて，第1段のSMRC装置は上記理由により決定された．第2段SMRC装置については，外乱源として推力ミスアライメント（1/200）とM-25モータ点火時に予想される最大横推力を考慮して解析した結果，2基（推力値の解析条件は最悪値の110N[第1段も同様]）に決定している．第2段SMSJ装置は，M-25モータ燃焼終了後の3軸制御においては空気の影響が小さいため，大きな制御力を必要としないが，第3段打ち出し方向への指向制御（リファレンスチェンジ）は，10s程度の間にこれを完了する必要がある．よって，これが事実上の推力要求となる． $1^{\circ}/s^2$ の角加速度（ピッチ/ヨー軸）に相当する推力は34kgfである．ノーズフェアリングの開頭及び分離時の外乱を指定時間内に吸収するためにも同程度の角加速度レベルが必要である．

第2段SMSJについては，デューティに対する要求がないため，その条件も考慮して解析した結果，4基に決定している．

SMRC，SMSJ装置の艀装は，第1段SMRCは後部筒外壁の4カ所に1基ずつ取り付け，第2段SMSJは，1/2段接手外壁に搭載し，第2段SMRCは2/3段接手部に搭載する．

第1段SMRC装置の作動時間は，制御開始が $X + 3s$ ，1/2段分離時刻が $X + 75s$ であるため，作動時間は72sになる．仕様については，マージンを見込んで75s以上とする．第2段SMRCとSMSJについては，第1段SMRCと同一仕様であるため，作動時間は同じく75s以上とした．

バルブの応答性は，制御シミュレーションにより設定されるが，ここではSMRCのバルブの応答遅れ50～60ms及び作動圧力条件による変動分を考慮して200ms以下とする．

従来の制御系からの精度要求は基本的にはなかったが，第2段SMSJの2/3段分離時及びリファレンスチェンジに対する姿勢制御要求は，号機毎に設定している．

5.1. 構成品の概要

構成品は，4号機までと同様で，

- (1) HGV（Hot Gas Valve）
- (2) ドライバ
- (3) 固体モータ（端面燃焼型）

で構成される．ドライバには，ショックマウントを装着している．

5.2. フライト結果

5～8号機における第1段SMRC，第2段SMRCおよびSMSJ装置は，機体の姿勢角，姿勢角誤差の履歴，位相履歴，各バルブの作動履歴によると，設定された制御パラメータに従って正常に制御されており，各バルブの応答性も地上試験と同等のものであったことから，良好な結果が得られたものと判断している。

但し，7号機においては，SMRC，SMSJの推進システムに異常が発生し，安全弁が作動するという不具合が発生した。この不具合により，X + 177s以降の時間帯で姿勢角誤差が若干大きくなったが，制御終了時刻までの間にピッチ，ヨーとも誤差を収束させ，事なきを得ている。詳細については，推進班の項を参照願いたい。

表－14にフライト時の性能結果を示す。図－15－1～10に6号機の第1段SMRC装置，第2段SMRC，SMSJ装置のフライト結果を示す。図－16－2に7号機において発生した内圧異常状況を示す。

表－14 第1段SMRC，第2段SMRC，SMSJ飛翔時の性能結果

		M-V-5			M-V-6			M-V-7			M-V-8		
制御装置	No.	バルブ圧力 (MPa)		有効 燃焼時間 (s)	バルブ圧力 (MPa)		有効 燃焼時間 (s)	バルブ圧力 (MPa)		有効 燃焼時間 (s)	バルブ圧力 (MPa)		有効 燃焼時間 (s)
		ON	OFF		ON	OFF		ON	OFF		ON	OFF	
B1 SMRC	1	3.4	2.8	95	3.8	3.0	90	3.4	2.8	96	3.4	2.7	100
	2	3.4	2.8	92	3.7	2.9	91	3.4	2.8	96	3.5	2.7	101
	3	3.6	2.9	93	3.6	2.8	93	3.4	2.7	97	3.3	2.6	102
	4	3.4	2.8	93	3.7	3.0	91	3.3	2.7	99	3.2	2.6	102
B2 SMRC	1	3.4	2.5	93	3.6	2.8	91	3.6	2.9	92	3.6	2.9	100
	2	3.7	2.9	92	3.7	2.9	95	3.6	3.0	93	3.6	2.9	98
B2 SMSJ	1	3.5	2.8	93	3.8	3.0	92	3.5	2.9	96	3.3	2.8	104
	2	3.5	2.9	93	3.7	2.9	91	3.5	2.9	97	3.3	2.7	102
	3	3.5	2.9	94	3.7	2.9	92	3.5	2.8	97	3.3	2.8	100
	4	3.5	2.7	95	3.8	3.0	90	※	※	※	3.4	2.8	102

※ 7号機 B2 SMSJ No.4 は，内圧異常により安全弁作動。

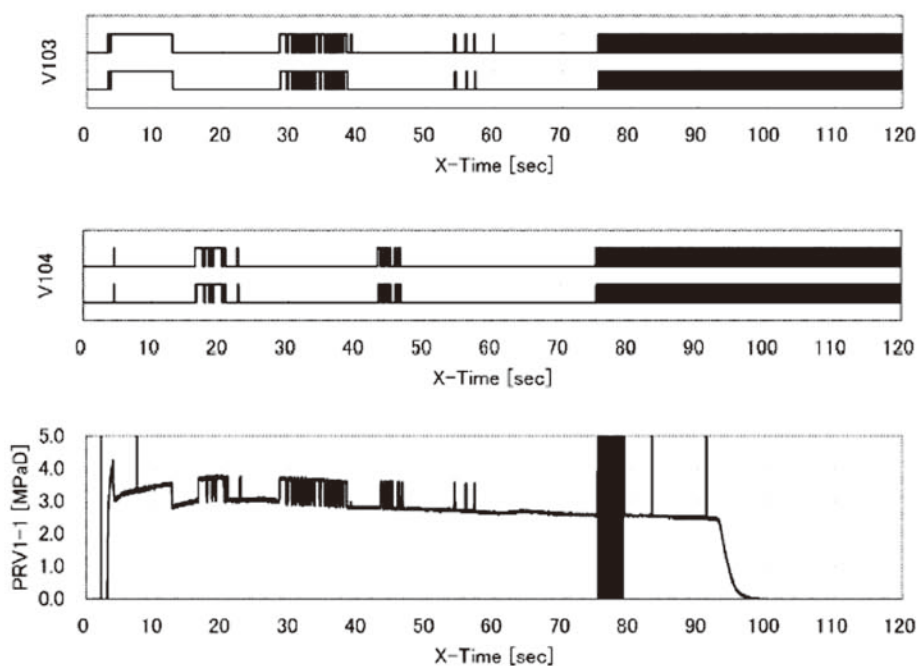


図15-1 第1段SMRC駆動・バルブ内圧 (No1)

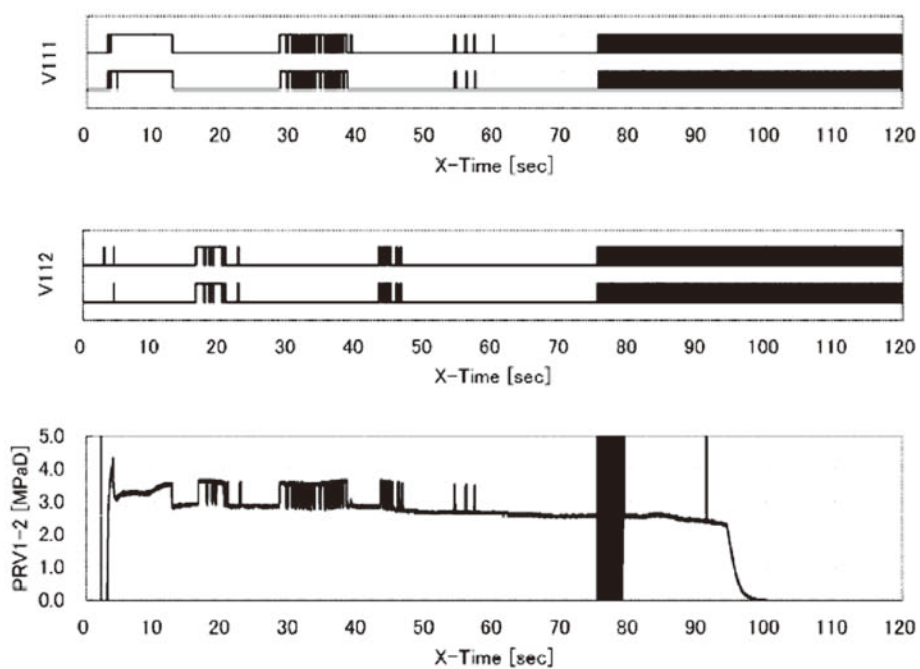


図15-2 第1段SMRC駆動・バルブ内圧 (No2)

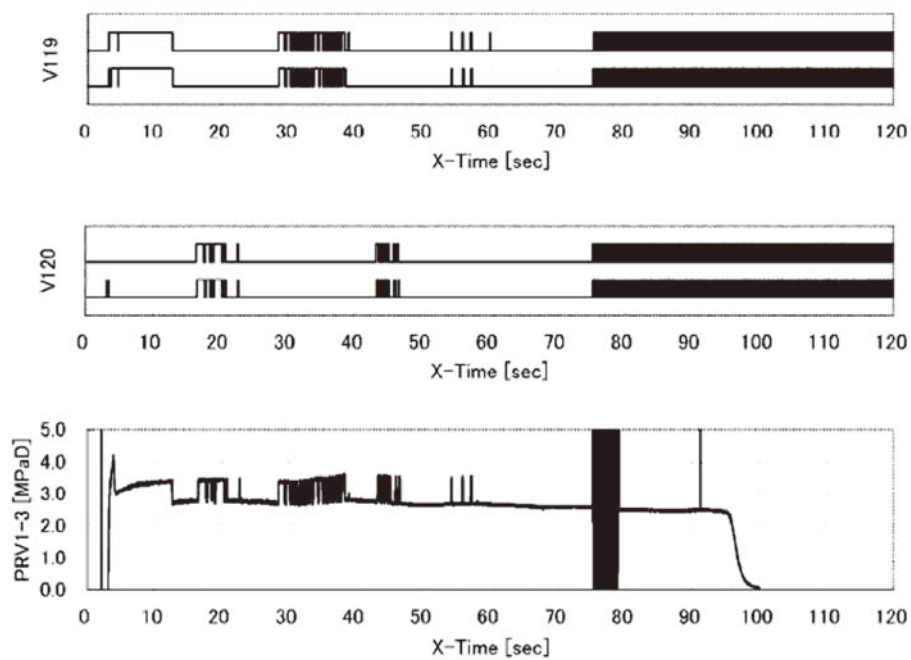


図15-3 第1段SMRC駆動・バルブ内圧 (No3)

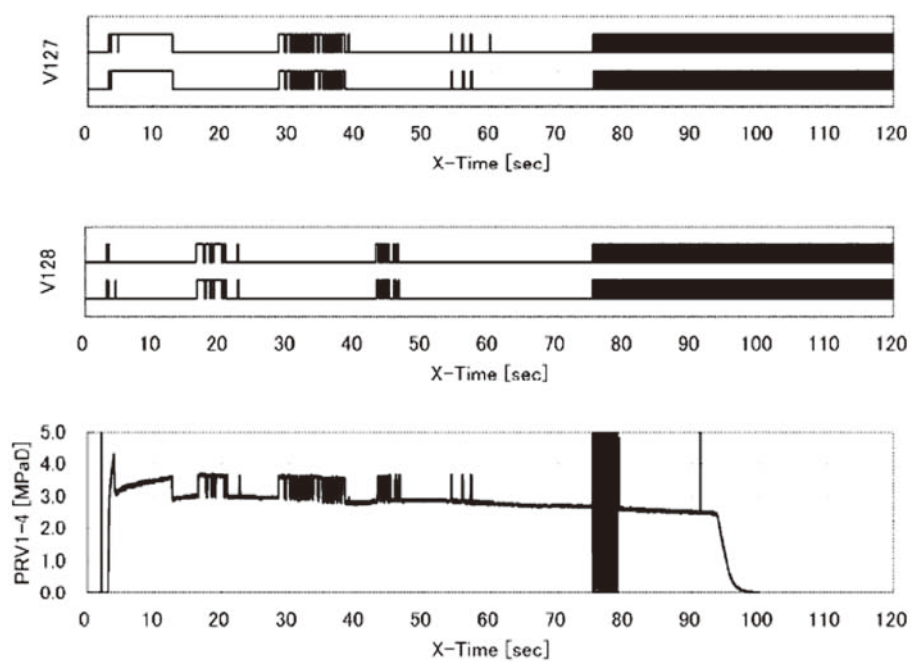


図15-4 第1段SMRC駆動・バルブ内圧 (No4)

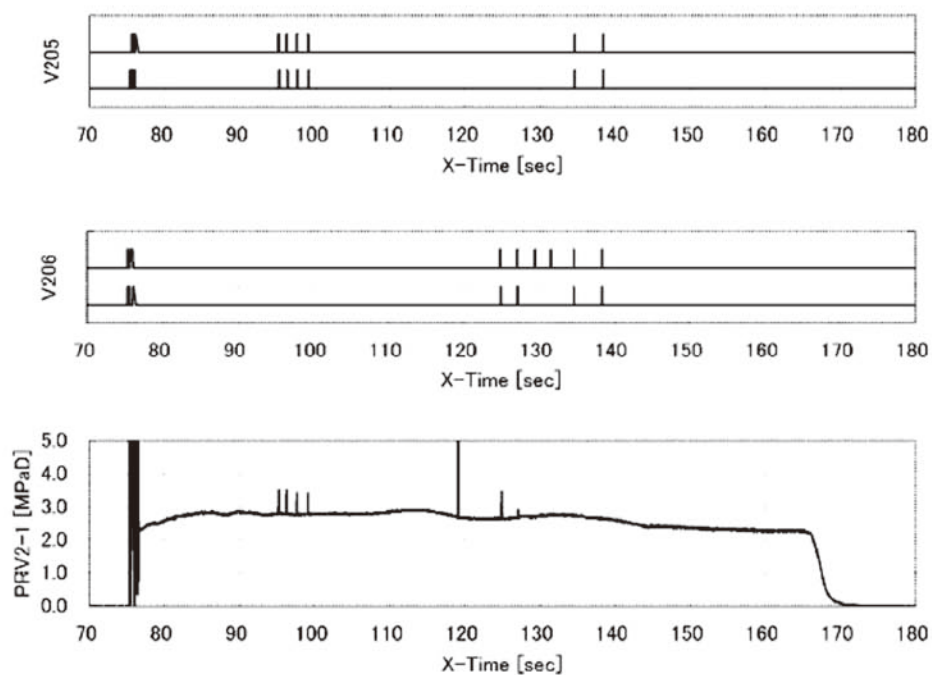


図15-5 第2段SMRC駆動・バルブ内圧 (No1)

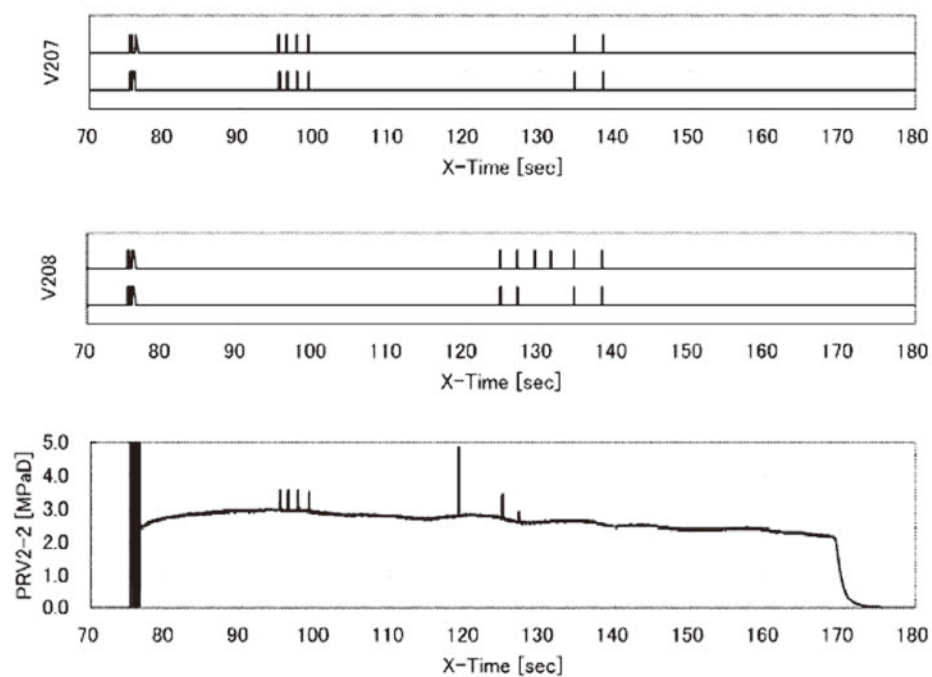


図15-6 第2段SMRC駆動・バルブ内圧 (No2)

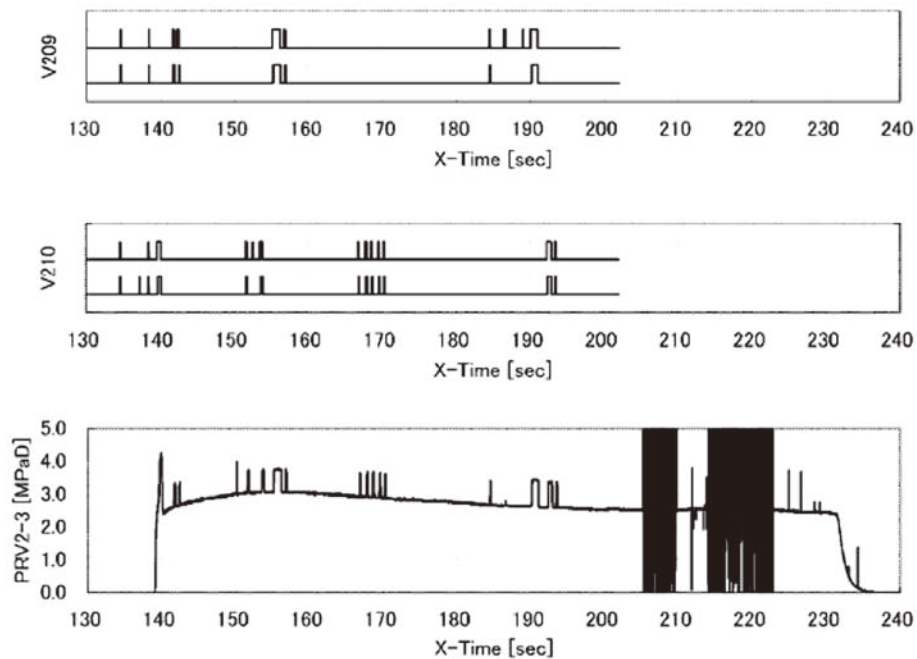


図15-7 第2段SMSJ駆動・バルブ内圧 (No1)

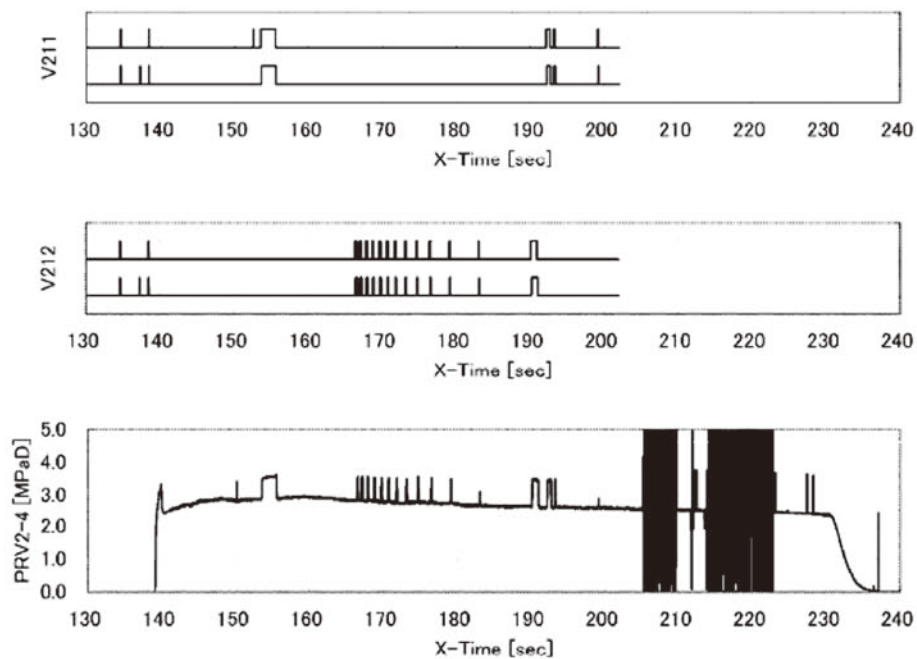


図15-8 第2段SMRC駆動・バルブ内圧 (No2)

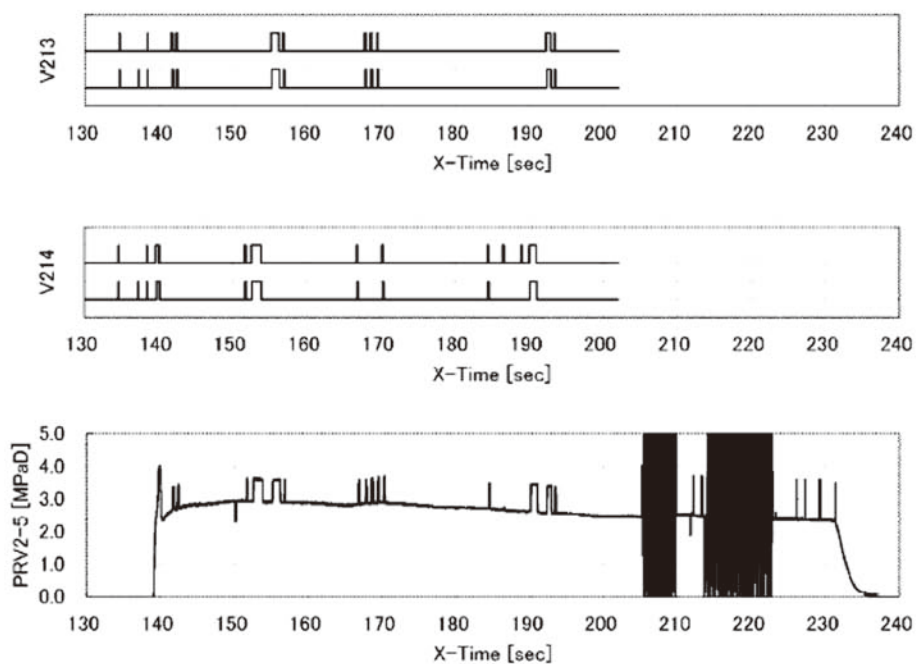


図15-9 第2段SMSJ駆動・バルブ内圧 (No3)

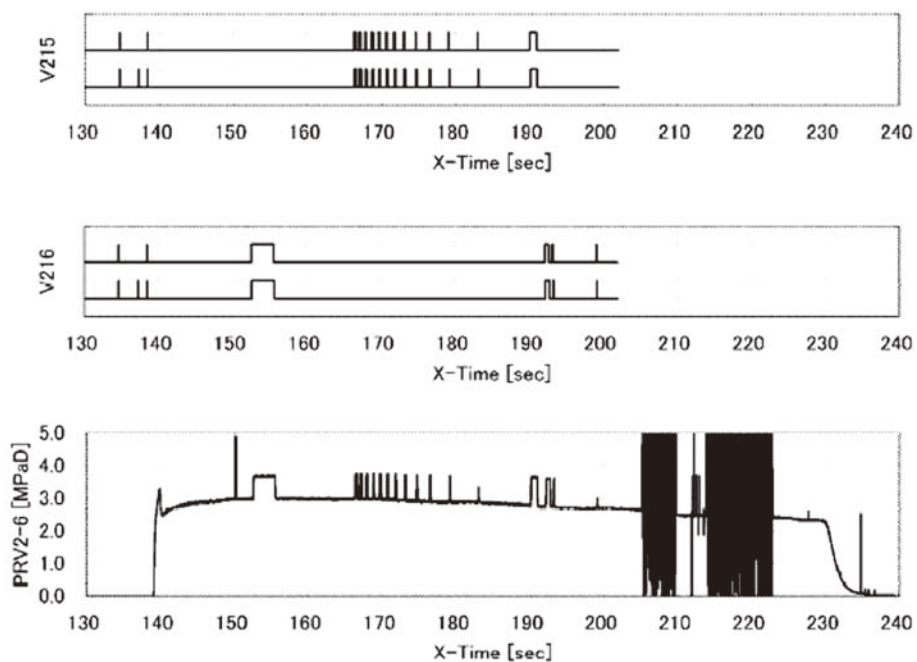


図15-10 第2段SMSJ駆動・バルブ内圧 (No4)

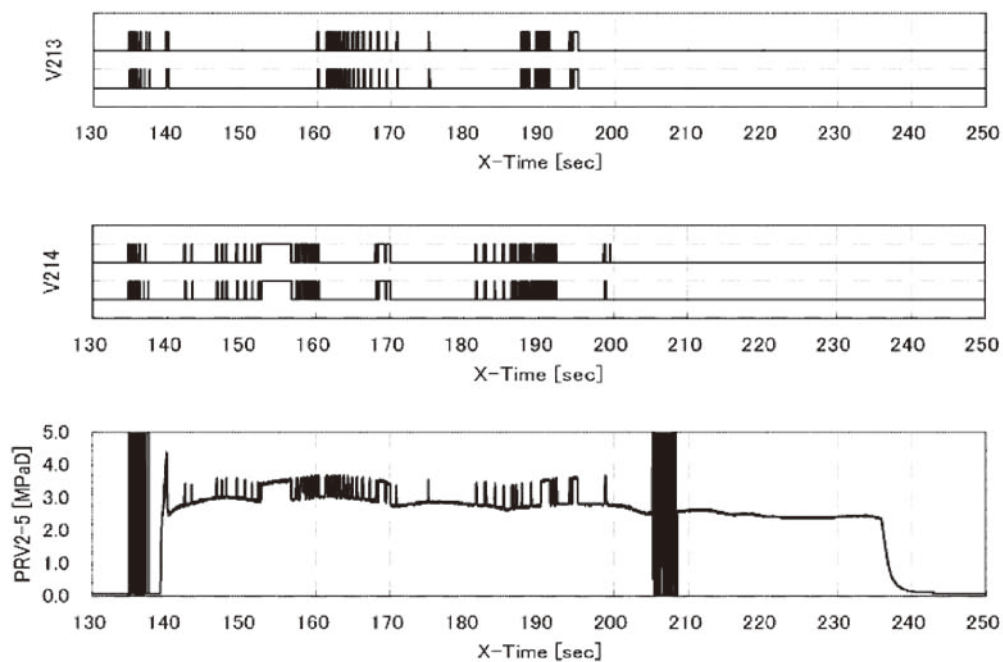


図16-1 第2段SMSJ駆動・バルブ内圧 (No3)

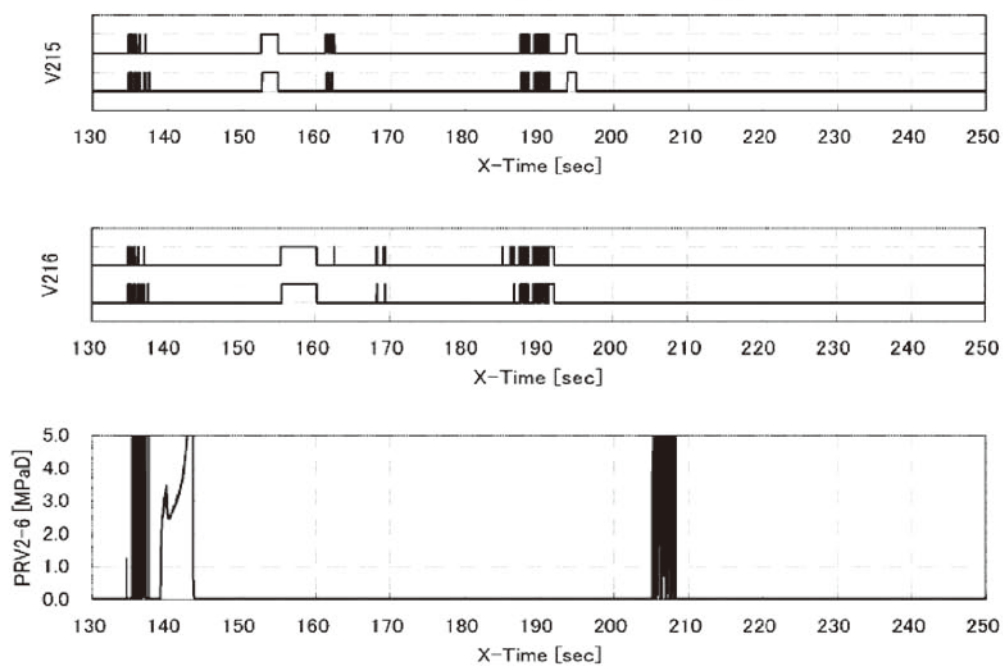


図16-2 第2段SMSJ駆動・バルブ内圧 (No4)

6. 地上系設備

6.1. 設備概要

TVC関連の地上設備を下記に示す.

- 1) 高圧窒素ガス製造設備
- 2) 整備塔内注気注液設備、発射管制用指令応答系
- 3) M管制室SJ/TVC管制卓
- 4) 熱電池起動操作・監視盤
- 5) TVC装置用各種支援設備機器

6.1.1. 高圧窒素ガス製造設備

本設備は、従来通り、液体窒素を圧縮して蒸発器（フィンチューブ）をとおり、気化させて気蓄器に貯蔵するものである。ここで製造されたガスは埋設配管をとおり整備塔1階のTVC中継盤に送られ、更にランチャブーム内に設置されている配管を経由して各種TVC装置及びその他必要とされる部位に供給される。ランチャブームの外側には機体への供給用中継ボックスが設けられている。

窒素ガス供給は、

- 1) 整備塔ランチャブームの6階位置 (M-24LITVC 供給, カプラ離脱用→4号機まで使用)
- 2) 〃 7階 〃 (ノーズフェアリング内湿度コントロール用)
- 3) 〃 9階 〃 (〃 内空調ダクト離脱用)

その他の付帯設備としては、整備塔1階TVC中継室を拠点として、整備塔内に供給用配管が設置されている。

- 1) 整備塔2階フロア (M-14MNTVC用油圧及びヘリウムガス, 窒素ガス供給用)
- 2) 〃 6階 〃 (M-24LITVCピストンセット用窒素ガス及びオイル, 噴射体供給用→4号機まで使用)

以上、TVCの各種飛翔前試験及び飛翔試験時の支援目的のための設備が完備している。

6.1.2. 整備塔内発射管制用指令応答系

地下管制室よりロケットへの指令応答用としてランチャブーム内に各種指令応答用回線が敷設されている。これにより、ロケット発射時刻の直前まで遠隔にて指令応答が可能になる。

図-17にTVC設備の配線系統図を示す。

6.1.3. M 管制室 SJ/TVC 管制桌

SJ/TVC管制卓の使用目的は、

- 1) ノーズフェアリング内湿度コントロール用窒素ガス供給のための操作及び監視.
- 2) 空調ダクト離脱のためのバルブ操作.
- 3) 上記2項目の圧力モニタ.
- 4) テレメータデータの表示及びデータ収録.
- 5) M/LS発射管制司令装置（中央指令卓）との指令応答.

6.1.4. 管制卓ソフトウェア

このソフトウェアは、SI/TVC管制卓に設けられたもので、次に示す機能を有している。

- 1) テレメータから伝送されるテレメトリデータを受信する。
- 2) 受信したデータに演算処理を行い、管制卓パネル及びモニタに出力する。
- 3) 受信したデータを収録し、これをパネル及びモニタに出力する。

このソフトウェアを3つのコンピュータ（ホスト，ターゲット1，ターゲット2）で運用する．これらの接続は，テレメータとターゲット1の間と，ターゲット2とホストの間をイーサネットで行う．ターゲット1とターゲット2の間は，VMEbus結合である．

6.1.5. 熱電池起動操作・監視盤

- 1) 管制室から地上回線を通して整備塔7階ランチャブームより熱電池起動用の電力を供給する（電源ユニット内装）。
- 2) 電流・電圧モニタ，抵抗値測定，立ち上がり特性取得等の機能を有している。

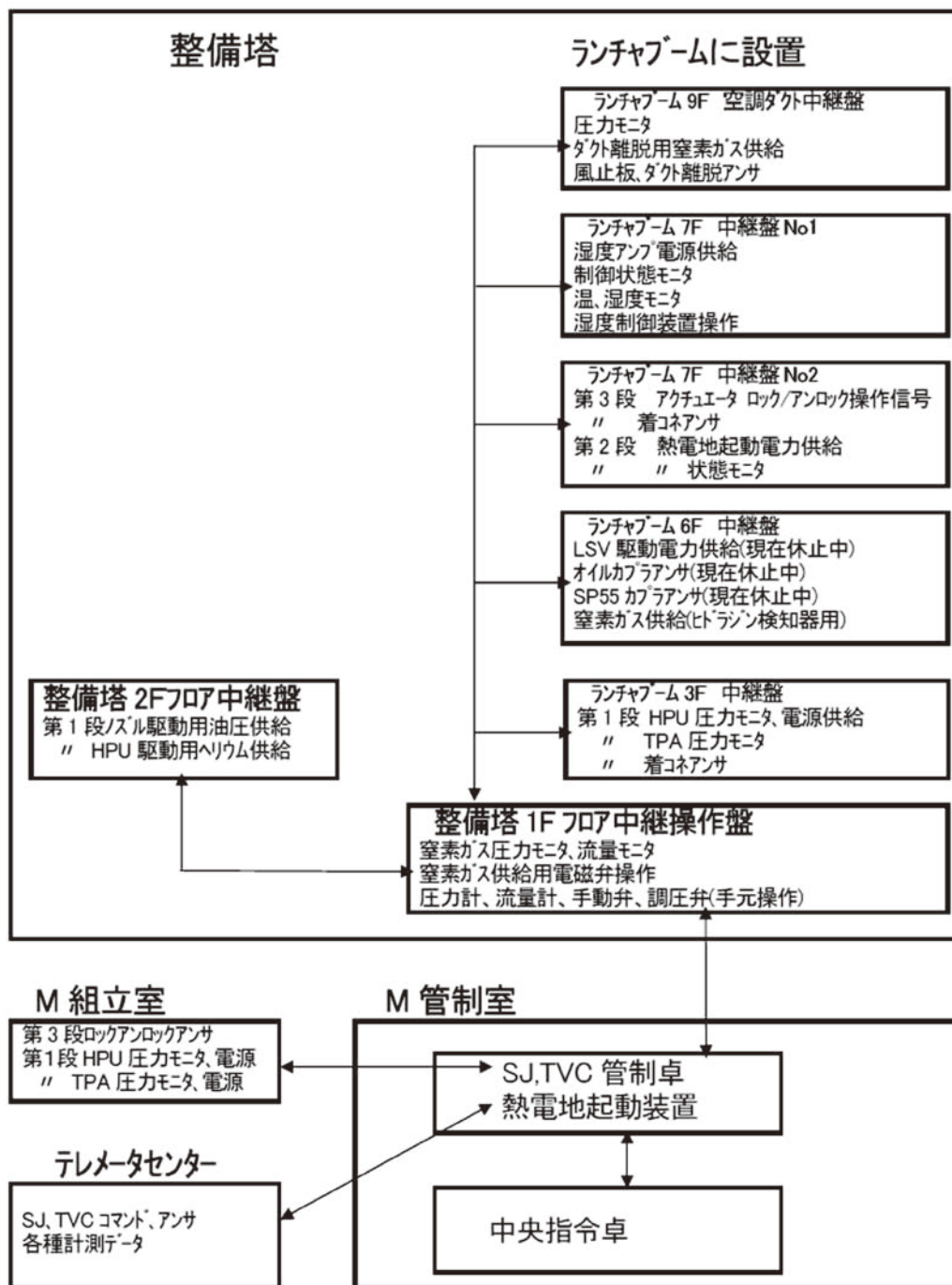


図-17 TVC設備配線系統図

7. 結

M-V-5～8号機までのTVC装置は、全段に可動ノズル方式（MNTVC）を採用した。第1, 3段MNTVCは、4号機からの継続使用で、能力は十分なものであることを確認しており、信頼性の観点からも実績を積み上げている。2段目は、4号機まで旧来から使用してきた噴射体噴射方式（LITVC）を採用していたが、5号機より新規開発のMNTVC装置に変更された。これは、先の項に記述したが、電動アクチュエータ方式を採用したことで運用面において明らかな飛躍があった。単体機能試験、システム試験、噛み合わせ試験、各種オペレーションからフライトに至るまでの作業内容がシンプルで工程は大幅に削減された。

M-Vにおいても一歩ずつ実績を積み上げることで、性能及び信頼性向上、運用面の効率化を図ることができた。

TVCの歴史は、LITVC装置に始まり現在に至るまで20数機のロケットを打上げてきた。開発当初は数々の困難に直面し、運用においても数えきれないほどのトラブルを経験した。しかし、現在を考えると、それらの経験が我々の技術力の向上に繋がったものと確信している。残念ながら誇りあるMシリーズのロケットは、本報告書をもって終了することになったが、幸いなことに次期個体ロケット計画がスタートし、更なる目標ができた。今後においては、その目標に向かって少しでも貢献できればと考えている。

最後に、ここまで支えてくださった関係者の方々には、心よりお礼を申し上げたい。