

M-V ロケットの構造・機構

峯杉賢治*

1. 全体概要

M-V ロケットは、5号機から、打上能力の向上と低コスト化を図った改良型 M-V ロケットを投入した。5号機以降の M-V ロケットの主な構造要素を、5号機を例として図1に示す。構造・機構関連で1～4号機の機体からの主要な変更点は以下の通りである。

- 1) CFRP 化された第2段 M-25 モータケース
- 2) 分離部が1カ所になって簡素化された1/2段接手
- 3) 短縮化された2/3段接手
- 4) SMRC の本数減少で小型化された後部筒 SMRC カウリング

尚、文中での「ランチャから x° 位置」とは、ロケット中心からランチャの方向を 0° として、上方から見て反時計回りに x° 回った位置を表す。

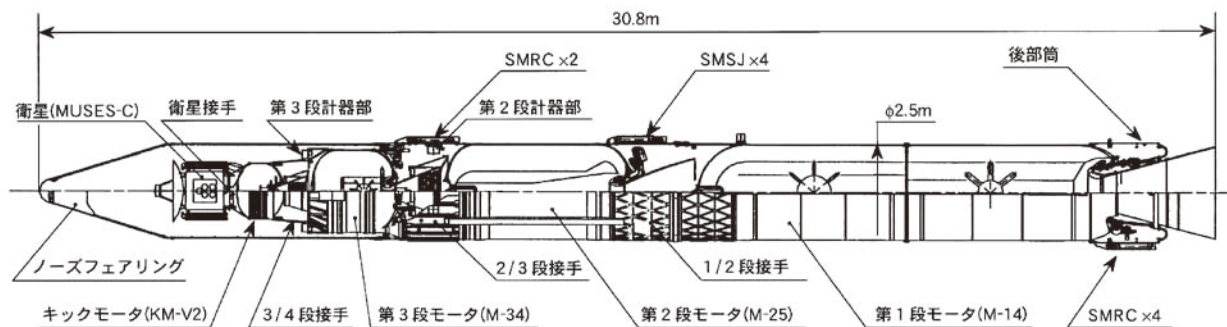


図1 M-Vロケット構造概要 (M-V-5号機)

2. 構造・機構設計

2.1. ロケットモータケース

2.1.1. M-14 モータケース

基本的には、4号機までと同じ設計である。ただし、5号機から、第2段モータが改良され、その最大燃焼圧が従来の2倍となった。これにより、ファイア・イン・ザ・ホール時の2段モータの燃焼ガス圧による前部鏡板の

* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA

座屈が懸念されたため、この前部鏡板の最小板厚を従来の4.3mmから5.5mmに増厚した。表1にM-Vロケットの各モータケースの諸元を示す。

表1 M-Vロケットのモータケース諸元

機体名称	M-V					
段	1st	2nd		3rd	KM	
ロケットモータ名称	M-14	M-24	M-25	M-34	KM-V1	KM-V2
内容積 $V(\text{m}^3)$	51.2	19.3	20.8	6.3	0.81	1.49
公称径 (m)	2.51	2.51	2.5	2.17	1.18	1.44
全長 (m)	11.0	4.76	4.96	2.26	1.01	1.21
燃焼時最大圧力 $P(\text{MPa})$	5.9	5.9	11.8	5.9	5.7	5.2
円筒部最小板厚 (mm)	6.4	5.8	—	—	—	—
全質量 ¹⁾ $M(\text{kg})$	<5768	<1839	1421	377	48.9	66.0
材料	HT-230M HT-150	HT-230M HT-150	CFRP (IM700/Q153)	CFRP (IM7/2020)	CFRP (IM7/2020)	CFRP (IM700/Q153)
性能指標 $PV/M(\times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2)$	>5.2	>6.1	17.3	9.9	9.4	11.7

1) フランジ、ボス等を含む

2.1.2. M-25モータケース

第2段ロケット (M-25) モータケースは新規開発であり、従来の高張力鋼製のM-24モータケースから、フィラメントワインディング (FW) によるCFRP製へと変更した。図2に示すように、全長 4.96m、内径 2.47mであり、ヘリプレーン層、フープ層、UD層、ダミーフープ層、前・後部ボス、前・後部スカートで構成されている。

本モータケースはM-25モータの高圧燃焼に対応し、且つ、高性能・低コスト化を目指して、以下の技術を採用した。

- ・高強度CFRP材
- ・ヘリプレーン巻き
- ・Waferによる局部補強
- ・サークリップ
- ・インシュレーションの先貼り

以下に各項目の説明を記載する。

[高強度CFRP材]

本モータケースは、繊維強度6.4GPaのIM700と破断伸度10.1%の樹脂Q153のCFRPプリプレグを用いている。本プリプレグは、繊維のうねりによる材料強度の劣化を引き起こさないように、その厚さも極力低減するように工夫されており、その結果、先に開発されたM-34モータケース等に使われているIM7/2020と比較して約1.3倍の強度が得られている。このCFRP材の物性値を表2に示す。

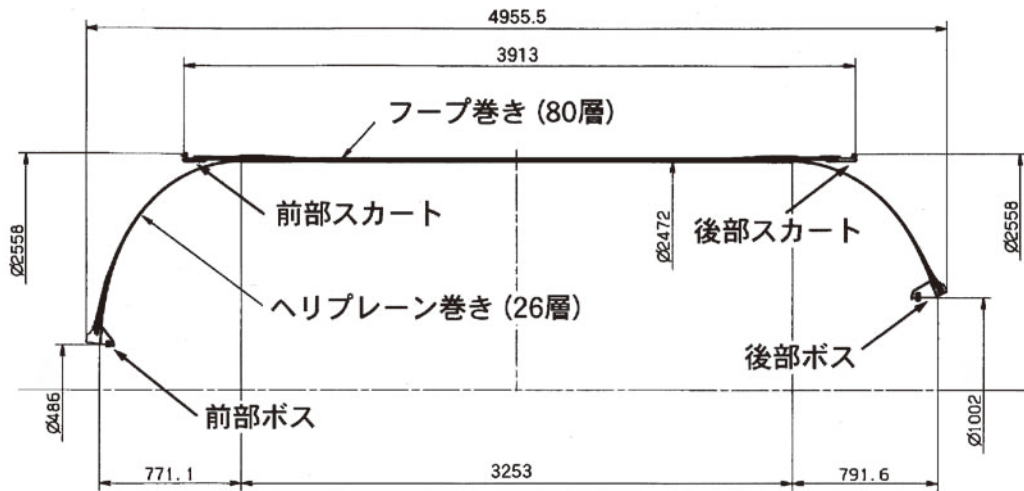


図2 M-25 モータケース

表2 M-25, KM-V2, M-34 モータケースの設計に用いたCFRP材の物性値

CFRP 材名	IM700/Q153	IM7/2020
繊維方向ヤング率 [GPa]	176.4	159.7
繊維直交方向ヤング率 [GPa]	9.05	9.02
繊維方向強度 1 ¹⁾ [GPa]	2.134	1.656
繊維方向強度 2 ²⁾ [GPa]	2.406	2.156
層間剪断強度 [MPa]	27.4	27.4

1) ドーム一般部 2) フープ層

[ヘリプレーン巻き]

フィラメントワインディングではインプレーン巻きとヘリカル巻きが代表的な巻き方である。前者は比較的短いモータケースの製造に有利であるが、M-25モータケースの様に比較的長いモータケースでは平行部の繊維方向と機軸とがなす角が小さくなるため、巻き付けた繊維が滑りやすくなる欠点がある。一方、ヘリカル巻きでは比較的長いモータケースの製作は容易であるが、厳密な意味で前・後部の開口部直径が同一となり、不都合である。したがって、図3に示すように、点線で表された設計すべきモータケースに対して、インプレーン巻きで繊維が滑らない巻き角になる仮想的なモータケースを考える（ステップ1）。次に仮想モータケースの平行部と前後のドーム部を切り離し、ドーム部は設計すべきモータケースと同じ位置に持ってくる（ステップ2）。最後に、前後のドーム及び平行部でステップ1での巻き角を極力維持するように巻き方を決める（ステップ3）。これにより、基本的には、前後のドームはインプレーン巻きで繊維が滑りにくく、且つ、平行部はヘリカル巻きでありながら、前後の開口部を異なる径で製作できることになる。この考案された巻き方をヘリプレーン巻きと呼ぶ。

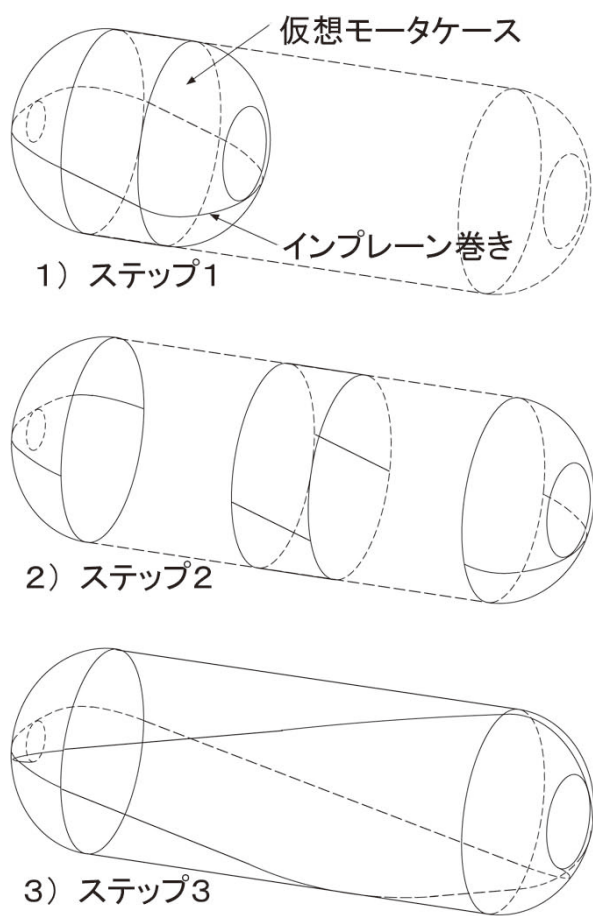


図3 ヘリプレーン巻きの説明

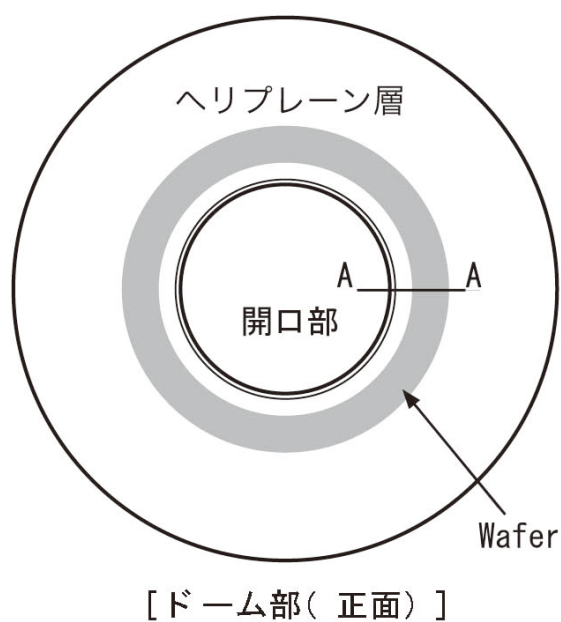


図4 Wafer概要

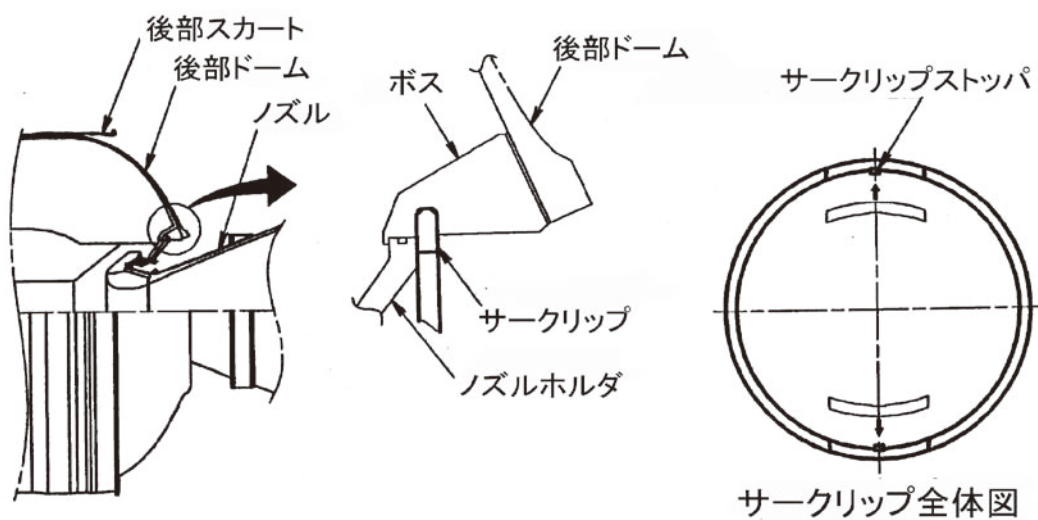


図5 サークリップ結合概要

[Waferによる局部補強]

ドーム形状は基本的にはいわゆるバランスドデザインの理論に従い決定されるが、その場合も、ドーム上での応力分布は様ではなく、ドームの開口部口元の応力が局所的に大きくなることもある。これを局部補強で処理できれば、モータケース全体の層数を増やさずに済み、軽量化が図られる。本モータケースでは、前・後ドームの開口部周辺に、Waferによる局部補強を適用している。Waferとは図4に示すように、薄いドーナツ盤状の補強板であり、本モータケースではこれをドーム部と同じCFRP材で繊維を主に周方向に配向して製作する。これを、ドーム開口部口元のヘリプレーン巻きの層間に挿入することにより、口元周辺の繊維方向応力の低減を実現している。

[サークリップ結合]

燃焼内圧の増加に対応すると共に系の簡素化を図るために、モータケースとノズルの結合には、従来のボルト結合を廃止し、図5に示すサークリップ結合を採用した。サークリップは図のように複数に分割されたリングであり、これをボスの溝にはめ込むことにより、ノズルホルダを固定する役目をしている。

[インシュレーションの先貼り]

ISASでの従来のFWモータケースでは、モータケース完成後にインシュレーションの施工を行ってきた。これに対して、作業性の向上と製造コストの低減を目的として、モータケースの内面形状を象った繭状の型であるマンドレルに先にインシュレーションを貼り付けてその上からプリプレグを巻き付けて製造する手法を本モータケースに適用した。

円筒部は29層のヘリプレーン層の外側に14層のUD層と80層のフープ層で構成されている。M-34等の従来のFWモータケースでは、UD層とフープ層は独立にまとめて積層されていたが、本モータケースの開発時に、フープ層の円周方向の割れが繊維まで切断し、モータケースの耐圧性能を低下させる現象が生じた。そのため、本モータケースでは、フープ層6層おきにUD層を1層挿入する積層方法に変更している。

上下段構造物とのインタフェースにあたるスカート部分は、従来、別部材を製作し、接着によってUD層と結合していたが、本モータケースではインタフェースを流れる荷重が大きいため、この手法では設計的に成り立たない。そのため、UD層を前後スカート端まで通して、ヘリプレーン層円筒部と一体成型する構造を採用している。インタフェース面には、一体成型したスカート端にアルミ合金製フランジを結合して、上下段構造物とボルト結合するようになっている。

本モータケースの円筒部外表面は、2カ所にケーブルダクトが接着されている。また、空力加熱によってCFRPの温度が100℃を越さないように、厚さ2.0mmのコルクで覆われている。

本モータケースの燃焼時最大圧力は11.8MPaで、これに接手などからの外荷重を合わせたものが使用制限荷重である。現時点ではCFRP製品の信頼性が金属製品に比べて確保しにくいことを考慮して、使用制限荷重の1.2倍を設計制限荷重としてある。諸元を表1に示す。性能指標は、M-24モータケースの $6.2 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$ から $17.4 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$ へと3倍弱程度改善される。図6に、地上燃焼試験前のM-25モータの写真を示す。

2.1.3. M-34モータケース

M-34モータケースに関しては、4号機以前と5号機以降で変更はない。



図6 地燃を待つM-25モータ

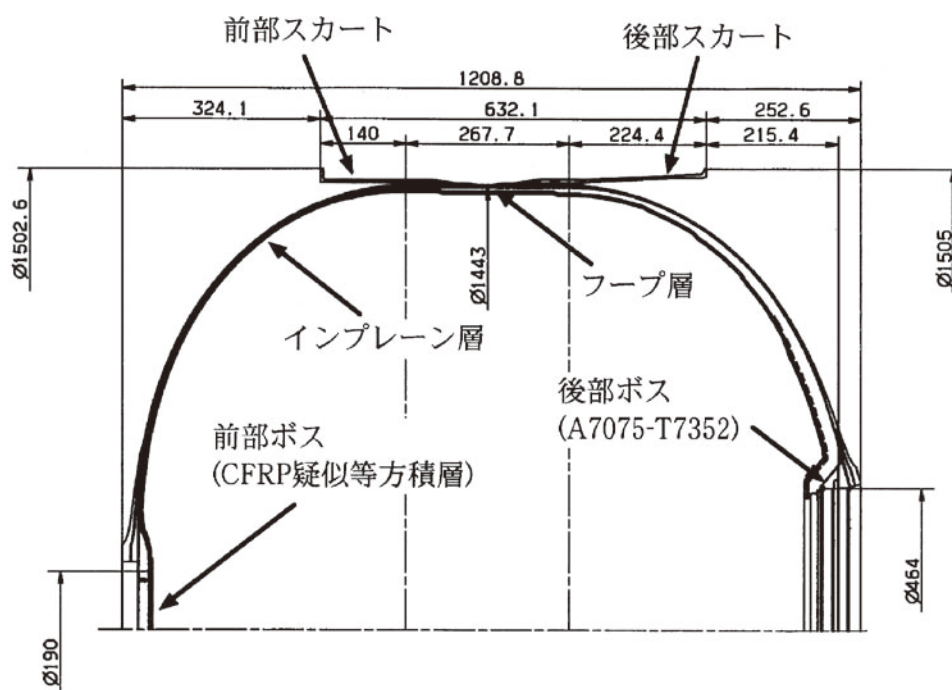


図7 KM-V2モータケース

2.1.4. KM-V2 モーターケース

5号機で使用された第4段キックモータ KM-V2 のモーターケースは、新規開発であり、図7に示すように、全長 1.21m、内径 1.44 m で、フィラメントワインディングによる CFRP 製である。本モーターケースの設計にあたっては、M-34 及び 1号機と 3号機で使用した KM-V1 モーターケースで培った技術に加え、M-25 モーターケースの開発に導入した新規技術も採用した。

インプレーン層、UD 層、フープ層、ダミーフープ層には、M-25 モーターケースで採用した高強度 CFRP 材 IM700/Q153 が使用されている。インプレーン層は 8 層からなり、前・後部ドーム部口元周りには、繊維方向応力の緩和のために、M-25 に採用した Wafer と呼ばれる局部補強層をインプレーン層内に挟み込んでいる。平行部は、M-25 モーターケースと同様にフープ層を UD 層で小分けにする方式を当初採用する予定であった。しかしながら、そのために余分な UD 層を追加しなければならず、打上能力に対する重量感度が高い本モーターケースの重量増を招いてしまう。これを避けるために、インプレーン層の間にフープ層を小分けにして挿入する手法を新たに採用した。つまり、21 層のフープ層の内 15 層は 3 層ずつ小分けにされてインプレーン層間の 5 カ所に挿入されている。残り 6 層は、インプレーン層のすぐ外側から UD 層 2 層、フープ層 3 層、UD 層 1 層、フープ層 3 層の積層構成で、UD 層で小分けされている。

ノズルホルダとモーターケースとの結合は、軽量化と簡素化のために M-25 モーターケースと同様にサークリップ方式を採用した。後部ボスは本方式に対応したリング用の溝を持った形状のアルミ合金製である。一方、前部ボスは、本モータが後方着火のため、イグナイタを結合する必要がある。したがって、M-34 モーターケースと同様に HTA/Q-132 の ($0^\circ / \pm 60^\circ$) 繊維方向の CFRP クロス材を使用した積層板である。両方のボスとも、応力集中によるインプレーン層の層間割れを防ぐためにボスとインプレーン層との結合面にはゴム (EPDM-E、一部、アラミド/EPDM) を挟んでいる。

前後スカートは M-34 モーターケースと同様に HTA/Q-132 の CFRP クロス材を使用して成型されている。後部スカートは 3/4 段接手を含めた軽量化を考慮して、 3.43° のテーパ角を持つ円錐台に設計されている。本号機の前部スカートには、電子機器が搭載板を介して搭載されている。

燃焼時最大圧力は 5.2MPa で、これに接手などからの外荷重を合わせたものが使用制限荷重である。現時点では CFRP 製品の信頼性が金属製品に比べて確保しにくいことを考慮して、使用制限荷重の 1.2 倍を設計制限荷重としてある。諸元を表1に示す。性能指標は、同じ CFRP 製のキックモーターケースである KM-V1 の $9.4 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$ に比べて $11.7 \times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2$ へと向上する。

2.2. 段間接手

2.2.1. 1/2 段接手

1/2 段接手は、低コストと簡素化による信頼性の向上を図るために、5号機から設計変更された。従来の 1/2 段接手は、開傘型であり、分離接手は円周方向に 3 分割された開傘パネルの上下 2 カ所に備えられていた。一方、新 1/2 段接手は、図8に示すように、1 段側構造物と 2 段側構造物の両方ともニッケル・クロム・モリブデン鋼製のラティス円筒であり、これらを 1 カ所の分離接手を介して結合する非開傘型接手である。1 段側のラティス構造は従来と同程度の空隙率 77% を確保しており、ファイア・イン・ザ・ホール点火された第 2 段ロケットの噴射ガスが無理なく通過できる構造となっている。2 段側構造物もラティス構造であるが、荷重条件が 1 段側構造物より緩やかなため、ラティスの肉厚や幅を 1 段側構造物より小さくして軽量化を図っている。また、2 カ所に 2 段ノズル周り TVC 機器用のアクセスドアが開けてある。従来号機において SMSJ4 機は 2 段ノズル周りに搭載されていたが、本号機からカウリングに収納されて外表面に 90° おきに配置されている。それ以外の外表面は、飛翔中の気流が 2 段ノズル周りに流れ込まないように、厚さ 1.8mm の遮熱板で覆われている。構体を許容温度の上限 100°C 以下に保つために、遮熱板には厚さ 1.0mm のコルクが貼られており、更に、SMSJ のプルームがあたる

部分にはCFRP製の熱防護材が配置されている。本接手の諸元を、表3に示す。

1段側構造物と2段側構造物とはFLSC (Flexible Linear Shaped Charge, V型成型被爆線)を周状に配した分離接手 (FLSC接手)を介して結合されている。この分離接手は、図9に示すように、従来号機の後部FLSC接手と同じ仕様になっている。FLSCは、アルミのシースで被覆した線状の火薬であり、ノイマン効果により爆発力を集中させるためにV字状の溝を持った断面形状になっている。FLSCは適切なスタンドオフを保つようにテフロンサポート内に挿入されている。更に、その周囲は厚さ4.0mmのコルクを貼ったカバーで覆われており、よって、FLSCは飛翔中の空気力から保護され、許容温度の上限80℃以下に保たれる。カバーの下端はリングに機械的に結合されておらず、充填材を用いて隙間を埋める。FLSCは1段側構造物に設けられたRSAD付き点火器により、CDF (Confined Detonating Fuse: 密閉型導爆線)を介して同時に両端から点火される。

本FLSC接手は、図9に示すように、1段側構造と2段側構造とを結合する3枚の1/3周帯状パネルと、そのパネルを切断するためのFLSCで構成されている。帯状パネルは分離前まで圧縮力と引張力の両方を伝達する設計になっている。火災防止リングは、帯状パネルを切断したFLSCの高速ガス流が内側に吹き込むことを防ぎ、ノズル等の接手内部の機器を保護すると共に、パネル切断後から第2段モータの推力が立ち上がるまで、この分離接手部に負荷される圧縮力を伝達する役目とする。

FLSCは冗長のために両端から起爆する設計であるが、FLSCが構体に1周巻き付けられており、2つの起爆部は同じ起爆ブロックに収納されている。本接手の開発時において、同様の分離接手を有する別ロケットにおいて、FLSCの片端起爆試験を実施したところ、起爆時の衝撃で、同一ブロック内に収納された他端の非起爆側まで損傷することが発生した。したがって、同様な現象が本FLSC接手でも生じることが予測されたため、起爆ブロックを従来のアルミ合金製からクロム・モリブデン鋼製に変更すると共に、FLSC起爆部の締結数も増加させる補強を行った。また、FLSC長さの公差を変更して、起爆ブロック内のFLSCのオーバーラップ長を短くすることも実施した。

本接手の分離試験は、フルサイズの分離試験を内之浦のM台地で整備塔から供試体を吊り下げて実施した。本試験は分離性能の確認だけでなく、2段側構造物の外面に搭載されたSMSJの分離衝撃環境の計測、及び、飛散するFLSCの保護カバーとSMSJのカウリングとの衝突の影響の調査を行った。図10にその分離試験の様子を比較のために旧接手の分離試験の様子と並べて示す。

2.2.2. 2/3段接手

2/3段接手は、図11に示すように、3段側構造、円錐台部、円筒部、及び、図には示されていないが、円筒部上端とノーズフェアリングとを結合するノーズフェアリング取付リングで構成されている。これらは、全てアルミ合金製である。5号機から変更されたCFRP製のM-25モータケースはドーム部が従来の高張力鋼製のM-24モータケースに比べて扁平である。そのため、3段ノズルとM-25前部ドームとの間隔を従来号機並に確保するために必要な接手長さは従来より小さくなる。したがって、2/3段接手は、軽量化のために、5号機から従来の円筒部の第1リングと第2リング間387.5mmを省略する短縮化がなされている。

円筒部は、内部に4本のリング、外部に24本の縦通材を配した補強円筒殻であり、円錐台部は、内部にのみ24本の縦通材を配した補強円錐台殻である。短縮化以外には素材や寸法等は旧接手と全く同じである。本接手の諸元を旧接手と比較して、表3に示す。分離機構も旧接手と同一のマルマンクランプ方式である。この分離機構の諸元を表4に示す。

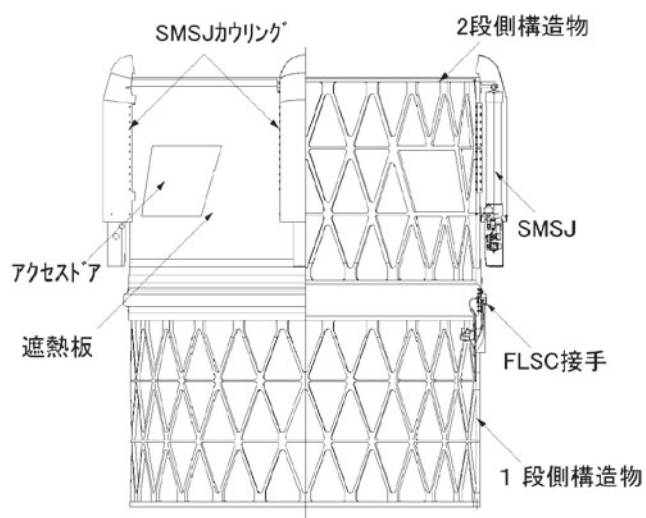


図8 新1/2段接手（5号機以降）

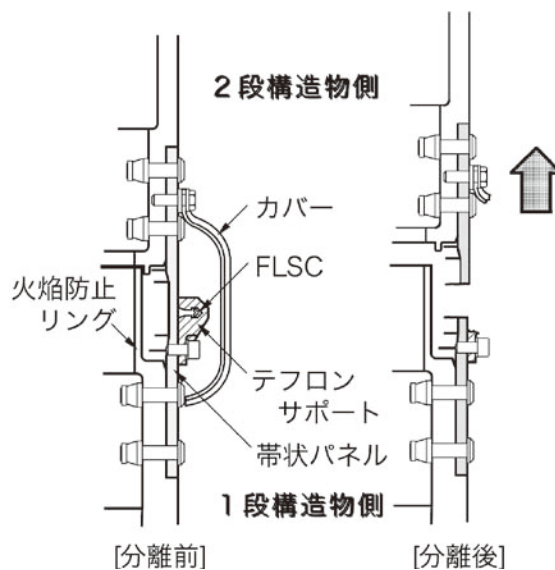
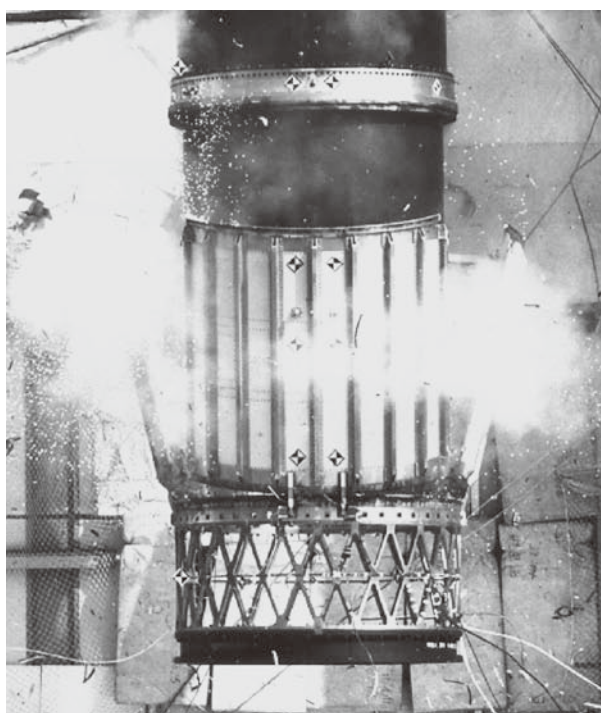
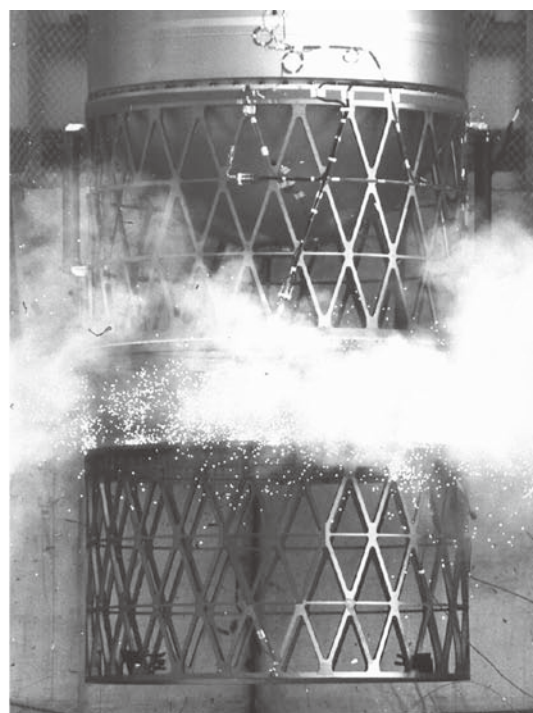


図9 FLSC接手



a) 旧1/2段接手



b) 新1/2段接手

図10 1/2段接手の分離試験の様子

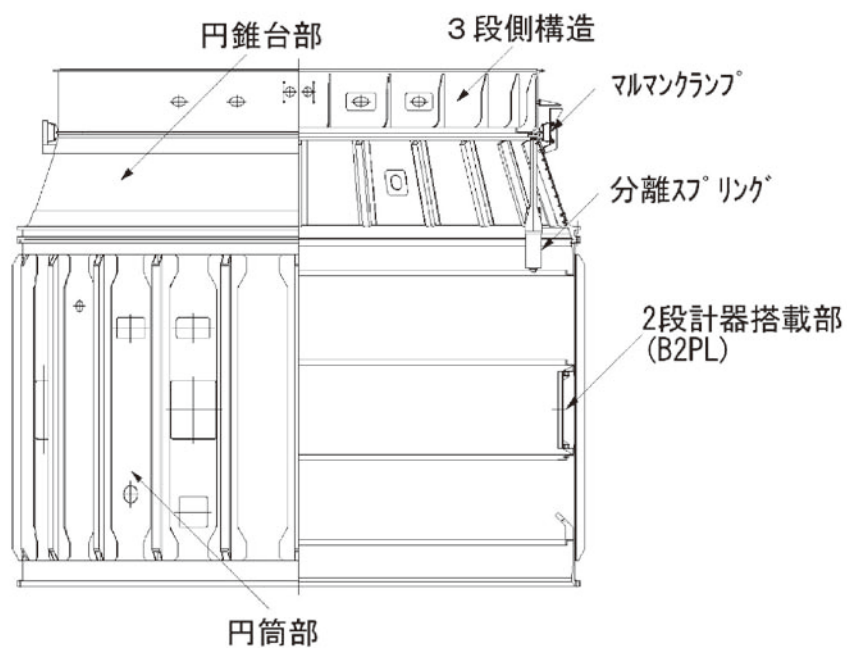


図 11 新 2/3 段接手 (5 号機以降)

表 3 新・旧段間接手の諸元

段間	新 1/2 段	旧 1/2 段	新 2/3 段	旧 2/3 段
全長 L (m)	3.13	3.84	2.35	2.74
直径 D (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
質量 M (kg)	1835	1762	777	904
構造様式	L ²⁾ +L	S ³⁾ +L	S	S
材料	Steel	Steel+Al	Al	Al
開傘/非開傘	非開傘	開傘	非開傘	非開傘
等価軸圧縮力 ¹⁾ F (kN)	703	703	344	344
性能指標 $FL/M(\times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2)$	1.18	1.50	1.02	1.02

註 1) 使用制限荷重 2) L : ラティス円筒 3) S : 補強円筒(円錐台)殻

表4 2/3段接手及び各上段接手の分離機構諸元

	2/3 段	#5_3/4 段	#5_衛星	#6_衛星	#8_衛星	#7_衛星
分離方式	マルマンクランプ	マルマンクランプ	マルマンクランプ	マルマンクランプ	マルマンクランプ	マルマンクランプ
分離部直径 (mm)	2204	1505	900	1262	1220	960
セパレーションナット D	M20 単×2	M16 単×2	M12 単×2	M16 単×2	M16 単×2	M16 単×2
バンド張力 (kN)	74.1	30.8	21.8	45.3	38.4	43.3
分離スプリング本数	24	18	14	18	8	6
スプリング力 (kN/1 本)	6.60	2.15	1.11	2.26	1.10	1.11
全スプリング力 (kN)	158.8	38.7	15.5	40.8	8.78	6.66
ストローク (mm)	200	128	97	100	80	101
分離速度 (m/s)	2.5	2.2	2.65	2.0	1.0	1.0
バンドキャッチャ数	20	14	12	14	14	12
コマ離脱機構 ²⁾	PL	PL	PL	PL	PL	PL
コマ離脱機構数	20	10	8	10	10	12

注 1) 単 : Single 2) PL : 引き込みアーム方式

2.2.3. 上段接手

M-V ロケットは3段式であるが、オプションとしてキックモータを装備することが可能である。3段式の場合の衛星とB3PLを結合する接手、及び、4段式以上の場合にキックモータと衛星を結合する接手を衛星接手と呼ぶ。また、4段式以上の場合、B3PLとキックモータを結合する接手を3/4段接手と呼ぶ。また、これらを総称して、上段接手と呼ぶ。

5号機が4段式であったため、3/4段接手と衛星接手を開発したが、6号機以降は全て3段式であったため、衛星接手のみの開発になっている。これらは、打上能力向上の目的で軽量化するために、全てCFRP製のスキンストリング構造になっている。スキンストリング構造は、薄いスキンと柱となるストリングとで構成されており、圧縮座屈強度を向上させるために必要に応じて中間リングを追加する。一般的には、上段側からインタフェース面に流れる荷重は均等な場合が多く、上段接手も周方向に様な構造が多い。ただし、5号機では、MUSES-Cの衛星構体特性によって、接手上端ではインタフェースの円周上の4点（60°、120°、240°、300°）に衛星からの荷重が集中する。その集中率は、平均荷重に対して最大2.2倍にもなる。一方、接手下端に結合されるKM-V2モータケースの前部スカートとのインタフェースでは、この集中荷重を前部スカートの許容値以下に分散する必要がある。そのため、図13に示すように、集中荷重が入る各点の位相が2つのストリング間の中央にくるようにストリングを配した。荷重集中点を挟むこれらのメインストリング（4点×2本の計8本）には比較的大きな荷重が流れるため、荷重集中を考慮して断面積を増加させる設計を行い、それ以外のサブストリング（計4本）は荷重集中を考慮しない設計を行った。また、7号機と8号機の衛星接手は強度標定ではなく、ランチングオフ時に衛星に加わる横加速度を低減するために、剛性標定で設計を行った。上段接手の例を図12、13に、各上段接手の諸元を表5に示す。

5号機以降の上段接手の分離機構は、すべてマルマンクランプ方式である。バンドは180度分ずつ2分割になっており、その2箇所の結合部にはセパレーションナットが1個ずつ使用されている。分離後のコマの保持方式としては、2/3段接手と同じ引き込みアーム方式と、コマを接手上端の補強リング上の押し出しスプリングによって半径方向に押し出し、バンドキャッチャで保持する押し出しスプリング方式がある。5号機以降については、全て引き込みアーム方式である。表4に上段接手分離部の諸元を示す。

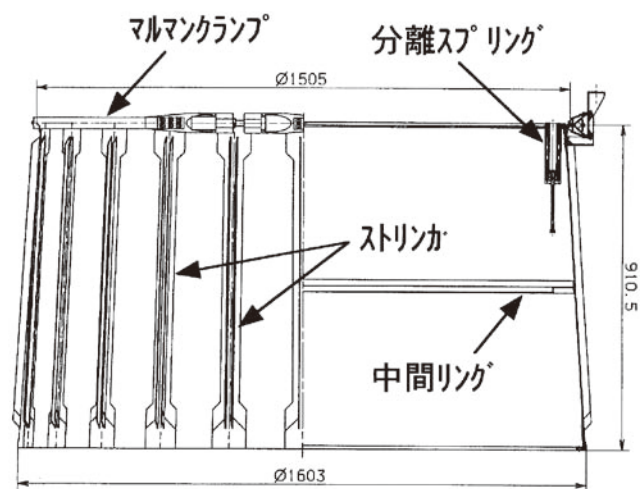


図12 5号機3/4段接手

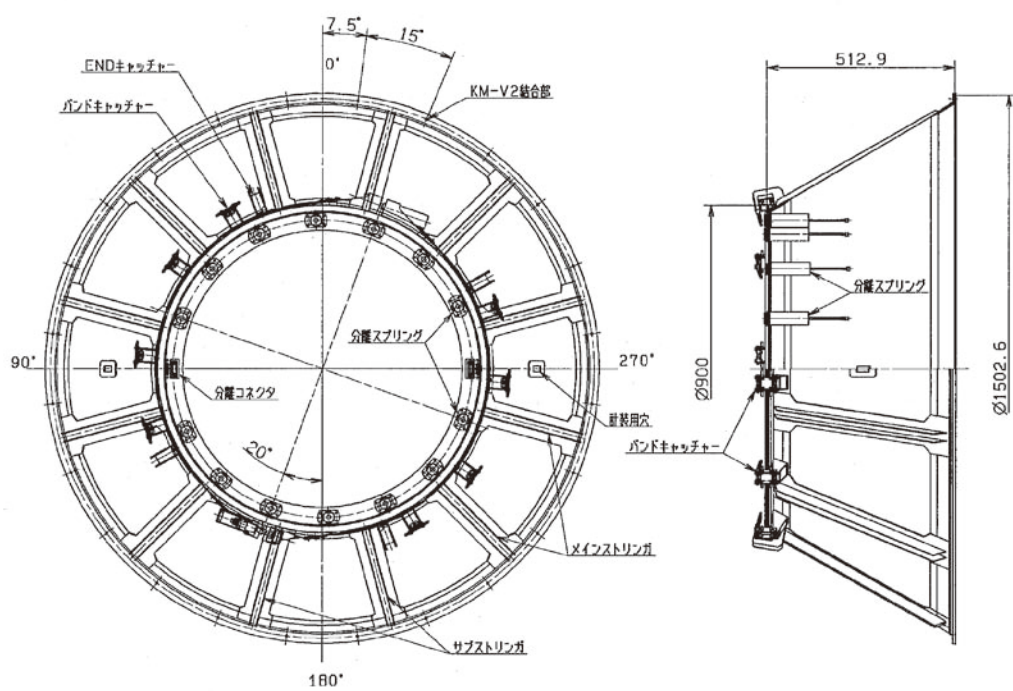


図13 5号機衛星接手

表5 上段接手諸元

段間	#5_3/4 段	#5_衛星	#6_衛星	#8_衛星	#7_衛星
全長 L (m)	0.911	0.513	0.35	0.53	0.60
最大外径 D (m)	1.60	1.51	1.60	1.60	1.60
質量 M (kg)	53.3	38.2	48.1	28.9	34.8
構造様式 ¹⁾	S	S	S	S	S
材料	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP
等価軸圧縮力 ²⁾ F (kN)	600.0	149.9	576.2	355.7	525.3
性能指標 $FL/M(\times 10^4 \text{m}^2/\text{s}^2)$	1.03	0.20	0.43	0.65	0.43

註 1) S : スキンストリング構造 2) 使用制限荷重

2.3. ノーズフェアリング

ノーズフェアリング構体は4号機以前と5号機以降では、各号機の衛星用アクセス窓の位置を除けば、全て同じ設計である。一方、分離開頭機構については、図14に示すように、基本的な機構は4号機以前と同一であるが、分離機構の火薬の薬量の変更が行われた。従来号機では、正常に分離機構が機能するMDFの薬量範囲は、本分離機構の信頼性確保の観点から、温度範囲 $0 \sim 80^\circ\text{C}$ でノミナル薬量の -25% から $+15\%$ の範囲以上と設定した。分離してもESMDCが破裂した場合は衛星が汚染されるので正常に機能したことにはならない。本接手の開発にあたって、作動薬量範囲を広げるために試験を繰り返して各種パラメタの最適化を行った。最終的に、試験で確認された本機構のMDFの作動薬量範囲は $0 \sim 80^\circ\text{C}$ で 15.6gr/ft (-26%) $\sim 24.3\text{gr/ft}$ ($+16\%$) である。この開発時の試験結果に基づき、従来号機のMDFの薬量は $21.0 \pm 1.0\text{gr/ft}$ に規定されていた。これに対し、同様の機構において、テフロンサポートの両端を拘束した状態で低温にして発火させると分離能力が低下する現象が報告され、5号機用のロット確認試験においても、この現象が確認された。そのため、薬量範囲の追加確認試験を行い、5号機以後の薬量規定を $23.1 \pm 1.0\text{gr/ft}$ に変更した。

2.4. ランチングフック

ランチングフックは、4号機以前と同一設計である。

2.5. B3PL (第3段計器搭載部)

B3PLはM-34モータと上段接手との間に位置し、図15に示すように、円錐台殻、機器搭載板及び周辺の支柱よりなる。構体重量は 97 kg である。号機によって搭載される機器の取付インタフェースや位置が変更されるため、それに応じて、機器搭載板のブッシュの配置が変更されることを除けば、4号機以前と基本的には設計変更はされていない。ただし、7号機において、打上げ時にB3PL内部の空気が衛星構体内を排気パスとしてフェアリング内に排出することを避けるために、円錐台殻のパネルに排気用の窓を設けた。また、6号機以降は機器搭載板上に実験用のサブペイロードを搭載するためのインタフェースを設けた。図16に8号機のサブペイロードがB3PLに装着された写真を示す。

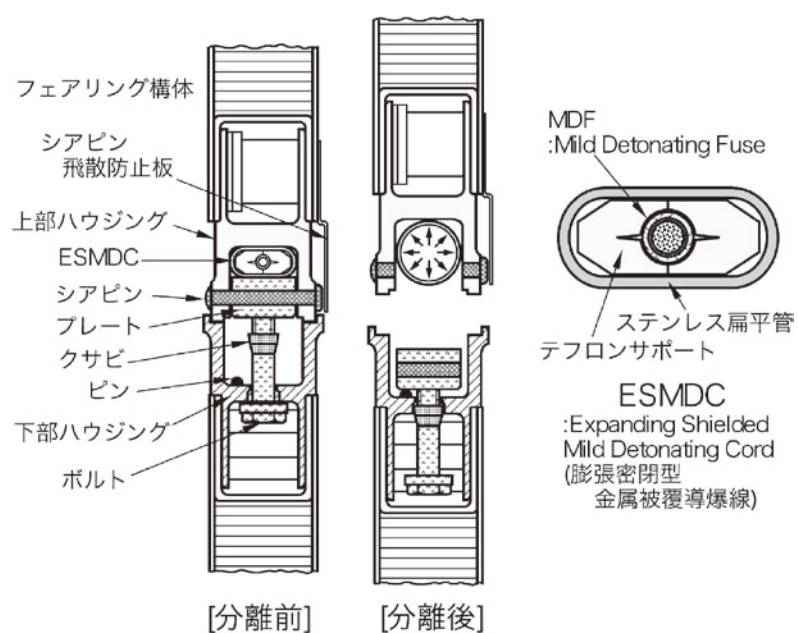


図14 ノーズフェアリング分離機構

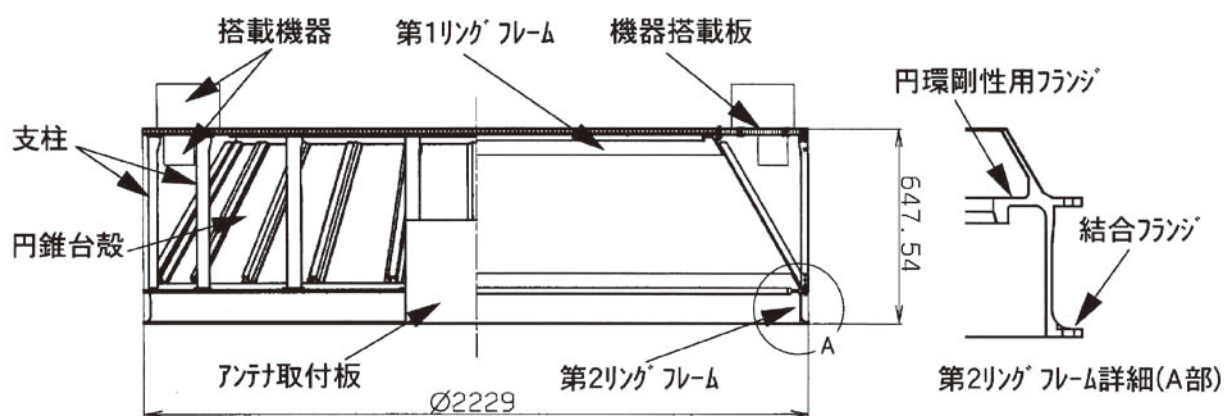


図15 B3PL 概要

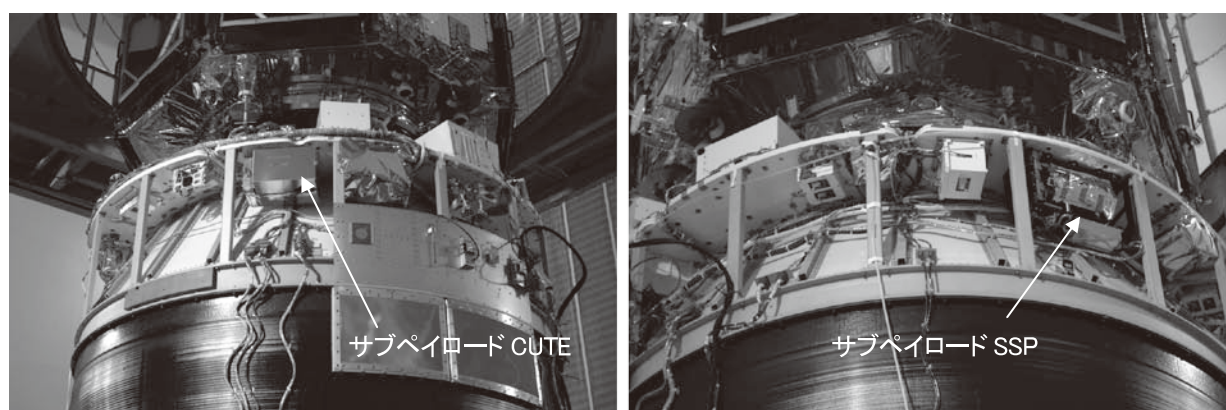


図16 B3PLに搭載されたサブペイロード (M-V-8号機)

2.6. 後部筒

後部筒は、図17に示すように、外板外径 2.61 m、全長 1.8mのアルミ合金製の補強円筒殻で、板厚0.16inch (4.1mm)の外板、16本の縦通材、4本のリングより成る。リングは外板の内側、縦通材は外側に配置し、製造性の向上を図っている。また、外板の厚さ、縦通材及びリングの数は、軽量化を標定とした概略最適化を行って決められている。

4号機以前、SMRCは4本ずつであったが、低コスト化のために、5号機から1本ずつに変更された。これに伴い、カウリングは2/3段接手円筒部外部に取り付けられているB2SMRC用のカウリングを採用した。したがって、カウリングやマウントの取付インタフェースも本変更に適合するようにインタフェースプレートの追加等、若干変更されている。これにより、SMRC用カウリングを含む後部筒の構体重量は4号機以前の797kgから644 kgに軽くなっている。

後部筒は飛行環境下で予想される最大温度においても強度余裕があるため、コルク等の熱対策は行われていない。ただし、縦通材の一部にはSMRCのブルームから熱的に保護するためにCFRP板及びコルクを貼り付けている。その範囲は、SMRCの本数の減少に伴い、カウリングが小さくなったこととブルーム吹き出し口が主構体に近づいたことにより、4号機以前より広がっている。

2.7. ケーブルダクト

飛行中の熱等の外部環境からワイヤハーネスを保護するために、M-14モータケース円筒部上にはB1ケーブルダクトが、M-25モータケース円筒部上にはB2ケーブルダクトが設けられている。B1ケーブルダクトはランチャ90°と270°位置に、B2ケーブルダクトはランチャ127.5°と307.5°位置に配置されている。

高張力鋼製のM-24モータケースからCFRP製のM-25モータケースへの変更に伴い、モータケースの内圧による径方向の変位が大きいため、1段に適用しているバンド方式の適用が困難であること、簡素化による組立作業性向上と工数削減が図れること、の2点から、B2ケーブルダクトには図18に示すウレタン樹脂製の接着型ケーブルダクトが採用された。本ケーブルダクトの重量は50kgである。

ウレタン樹脂の材質は、成型性、耐久性、防水性の面から高密度の表面層と低密度のコア層からなるインテグラルスキンドフォームとする。本材質で製作されたウレタンベースは、図18に示すように、装着されるワイヤハーネスに合わせた凹凸形状に成型されており、両側には本ウレタンベースを覆うアルミ合金製カバーを止めるためのボルト用ブッシュを兼ねたアルミ合金製補強材が埋め込まれている。ウレタンベースはモータケースと接着剤で接着されている。本接着部を含めてケーブルダクトの温度が80℃を越さないようにカバー表面には厚さ2.0mmのコルクが貼られている。先端のノーズキャップ及び後端のエンドキャップにはウレタンベースは無く、カバーのみで、それぞれ段間接手に直接あるいはブラケットを介して結合されている。



モータケースの前後スカート部が円筒部に接続される部分は燃焼時の内圧によって短い距離で径方向の変位に差が10mm程度発生するため、ウレタンベースがこの区間を跨ぐと接着剥離が生じる恐れがある。したがって、ウレタンベースは前後スカート接続部を含まない円筒部のみに施工する。前後スカート上では、ケーブルダクトは、ブラケットを介してスカートに接合されたカバーのみになる。この部分のカバーは、円筒部のケーブルダクトのカバーとの接続部、及び、ノーズキャップまたはエンドキャップとの接続部において径方向に大きな段差を生じるため、カバー同士を直接ボルトで結合するのではなく、フッ素ゴムシートを介して結合し、この段差を吸収する設計になっている。また、このカバーとスカートとの間にも隙間が生じるため、カバーの端に厚さ0.3mmのアルミ板をフィレット状に取り付けて、モータケースの変形でカバーが浮き上がってもその隙間をこのアルミ板がふさぐ設計になっている。

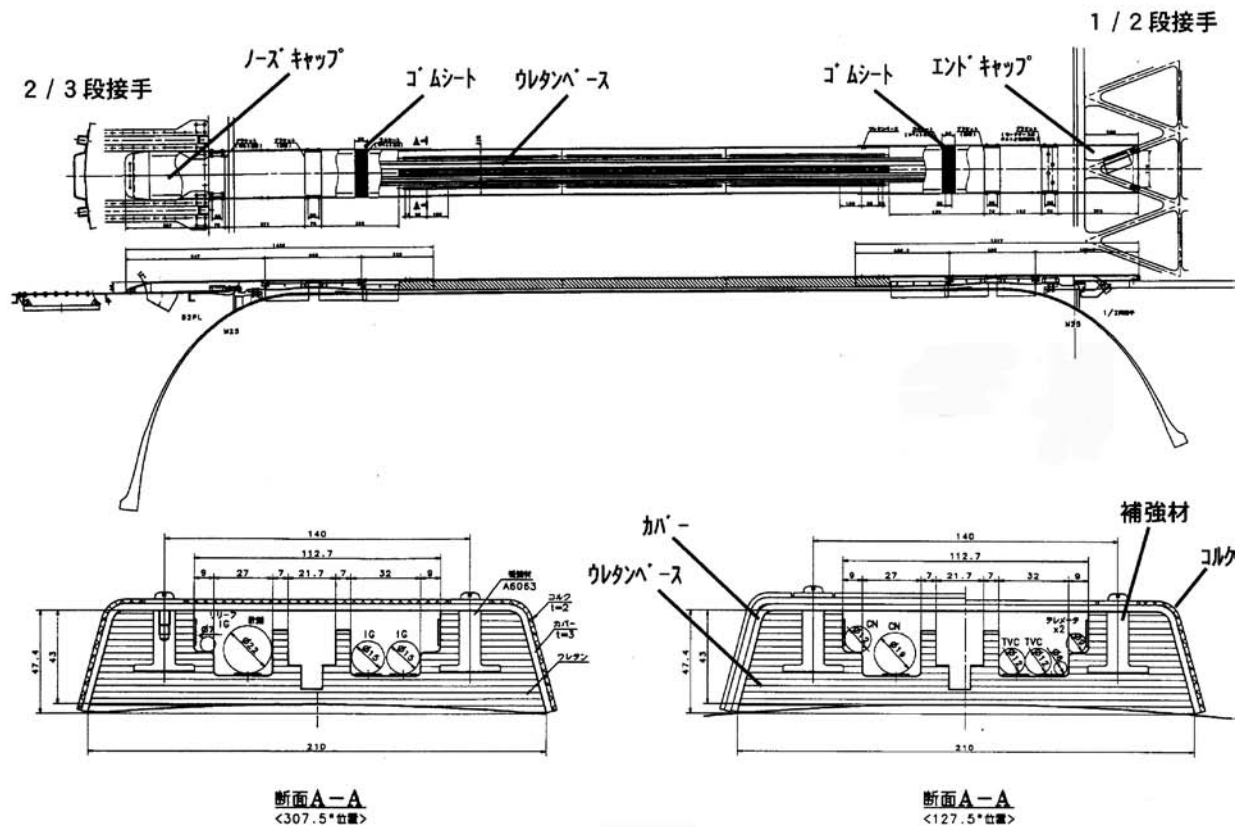


図18 B2ケーブルダクト

3. 機械環境

3.1. はじめに

5号機以降の機械環境は、基本的には4号機までのものと有意な差は見られない。以下に、5号機以降で特筆すべき事項について記載する。

3.2. 第2段M-25モータ着火衝撃

前述のように5号機から、第2段モータケースは、高性能化と低コスト化の目的で、従来の金属製からCFRP製になり、機軸方向の剛性が低下するとともに最大燃焼圧力も2倍になった。そのため、点火後、本モータケースの内圧上昇に伴う機軸方向への伸び量が従来号機より増加し、これに起因して発生する縦衝撃が大きくなる可

能性が、開発時に指摘された。これに対して、着火立ち上がり特性等を適切に設計することで対処した。

その効果を確認するために、従来の金属製モータケースの4号機と新しいCFRP製モータケースの5号機で1/2段分離時から2段着火時までのB3PL部とB2PL部の機軸方向加速度を1度メモリして、後に繰り返し地上に送信する方式を採用した。その加速度の時刻歴をそれぞれ図19に示す。図中の加速度時刻歴は、1/2段分離接手のFLSCの作動開始時刻を横軸の0secにしてある。時刻0sec直後の衝撃加速度はFLSCの作動により、接手が切断されたことによるものであり、その後、約0.15secで第2段点火による衝撃と内圧上昇に伴う機軸方向の加速度増加が観測されている。5号機の計測データは、4号機と比較して、推力上昇に伴う5号機の機軸加速度の立ち上がりは緩やかであることを除けば、ほぼ同じような傾向を示している。

これらの加速度時刻歴のSRSを図20に示す。20～30Hzと予測されていた第2段点火時の機体全体の機軸方向最低次振動モードについて、4号機ではその辺りにSRSの小さなピークが見られるが、5号機では全く現れていない。また、 $10.6\text{G} \times 10\text{msec}$ の正弦半波の規定値に対しても十分に低い。したがって、縦衝撃を考慮した新しいM-25モータの設計が妥当であることが確認された。

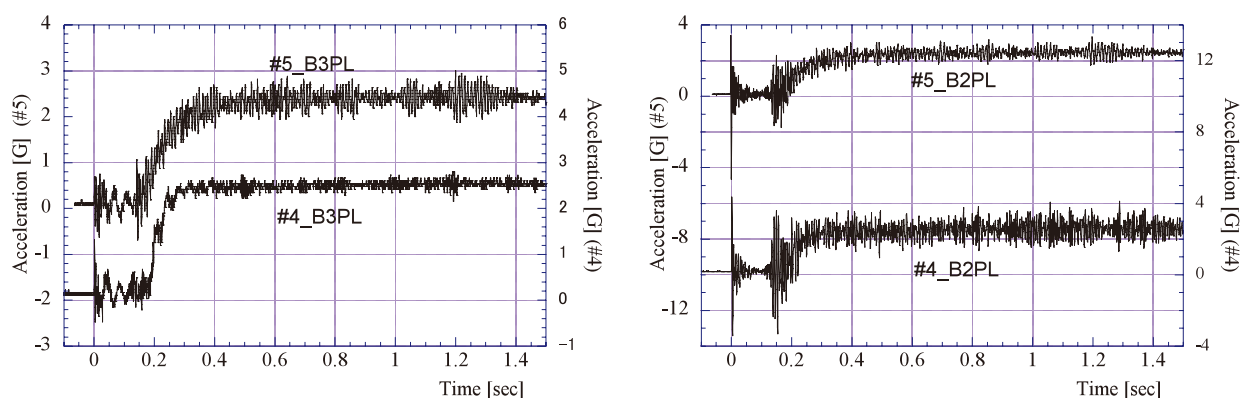


図19 第2段モータ着火時の加速度時刻歴

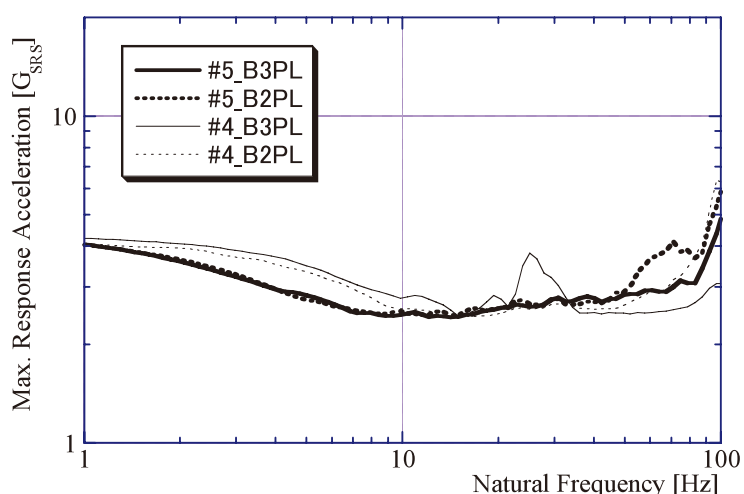


図20 第2段モータ着火時加速度SRS