

M-3Hの構造と機能

森 大吉郎・小野田 淳次郎・橋元 保雄・細村 建夫*

1. M-3Hの構造の特色

M-3H型ロケットにおいては、M-3Cと比較して構造に関係の深い新規項目として、

- a. 第1段モータの延伸増強
- b. キックモータの新規開発
- c. ノーズフェアリングの延伸と開頭方式の改良
- d. CFRP製構造部材
- e. キックモータ接手の開発

があげられる。

本稿では以上の各項について研究開発の概要を述べる。接手、ノーズフェアリング、および2・3段モータケース等については既に[1][2][3][4][8] M-3C型において刷新が図られているので、M-3H型では上記の改造に止まっているが、しかし、これによりM-3HとM-4Sとを比較すると全機にわたって原型をとどめないまでに改造が施されたことになる。

2. ノーズフェアリング

第1図に示すように、M-3H型ノーズフェアリングはM-3Cと同様FRPハニカム・サンドイッチ材とチタン合金を主体とした構造様式で、表面には耐熱用として2mm厚のコーキングが貼付してある。

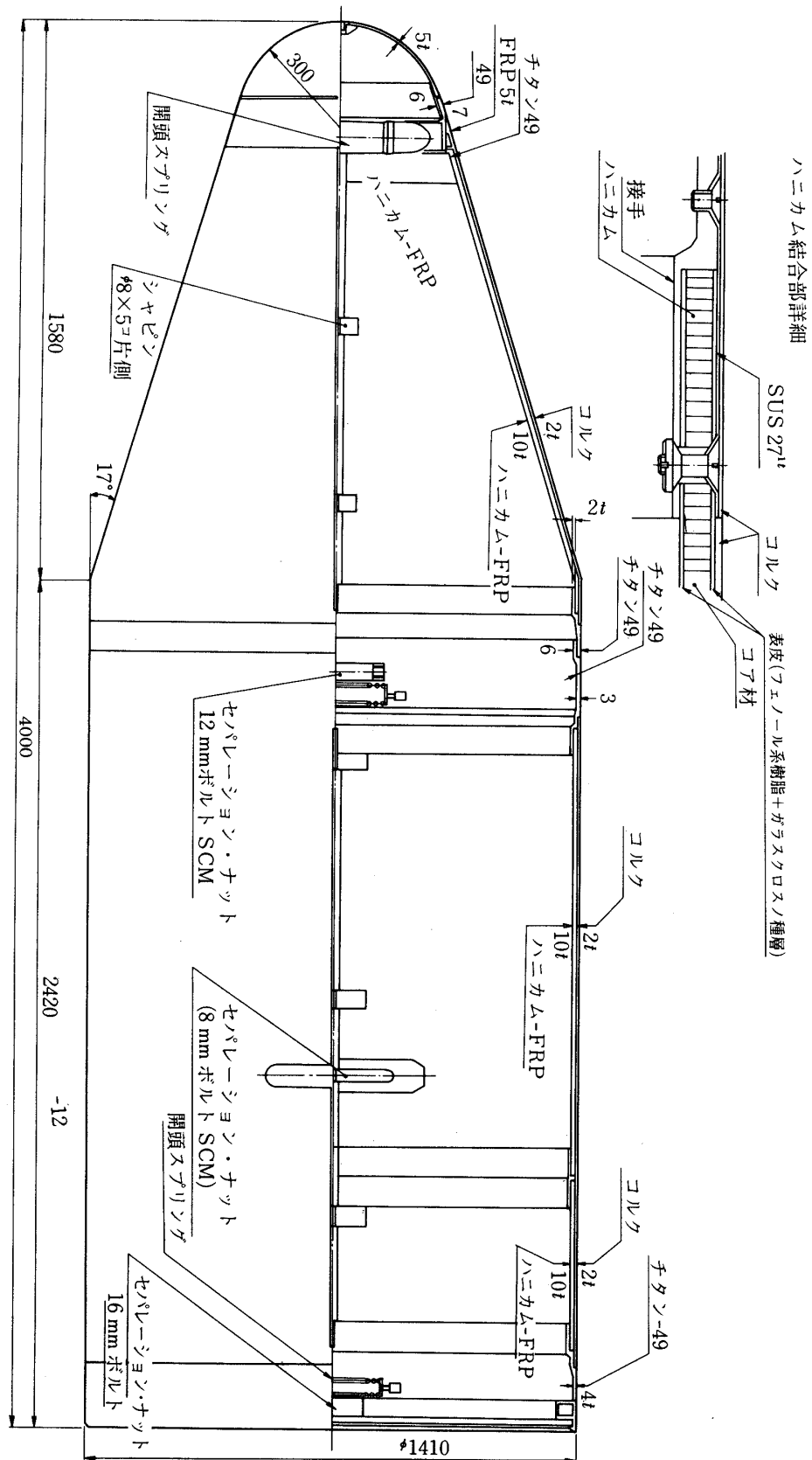
キックモータの搭載および衛星の大型化に伴い、平行部にチタン合金製接手を設けてERPハニカム部を500mm伸ばし、全長を4000mmとした。最大径1410mm、先端部半径300mm、半頂角17°等はM-3Cと同じである。

開頭機構はM-3C型に用いた2段開頭方式から、1段開頭方式へ変更した。これに伴って分離用スプリングを強化し、セパレーション・ナットを16個から12個に減らして機能上の信頼性向上を図った。なお、M-3C型ノーズフェアリングと諸元を比較すると第1表のようになる。

1) 荷重

空気流の荷重条件としては、最大動圧(1.4 kg/cm²)時の最大迎角を4°、遷音速時(動圧0.68 kg/cm²)の最大迎角を6°とした。これにより横方向最大荷重は4285kgと

* 日産自動車宇宙航空部



第 1 図 ノーズフェアリング概要

なる。

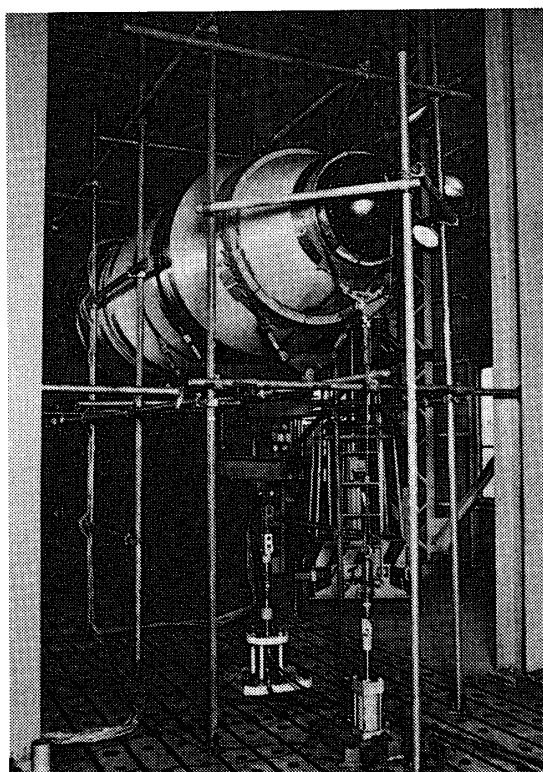
第 1 表 M-3C との比較

	全 長 mm	最大径 mm	重量 kg	材 料	開頭方式	スプリング力 kg	セパレーションナット	プッシャ
M-3H	4000	1410	290	FRPハニカム チタン合金	一体開頭	624 × 2 本 621 × 4 本	12個(6 × 2 重)	2 個
M-3C	3500	1410	255	FRPハニカム チタン合金	二段開頭	624 × 2 本 343 × 4 本	16個(8 × 2 重)	2 個

2) 地上試験

a. 平行開頭予備試験 M-3C 用地上試験器材を用いて 1 体開頭の予備試験を昭和 50 年 1 月に行った。試験の結果スプリング力の不足が判明したので、スプリング力の強化を行った上で、再試験を行い平行開頭の目安がついた。

b. 曲げ試験 (昭和 52 年 2 月) 第 2 図に示すように、ノーズフェアリングと計器部を結合した状態で、開頭片割れ面方向と割れ面より 90° 方向の 2 方向について試験を行った。

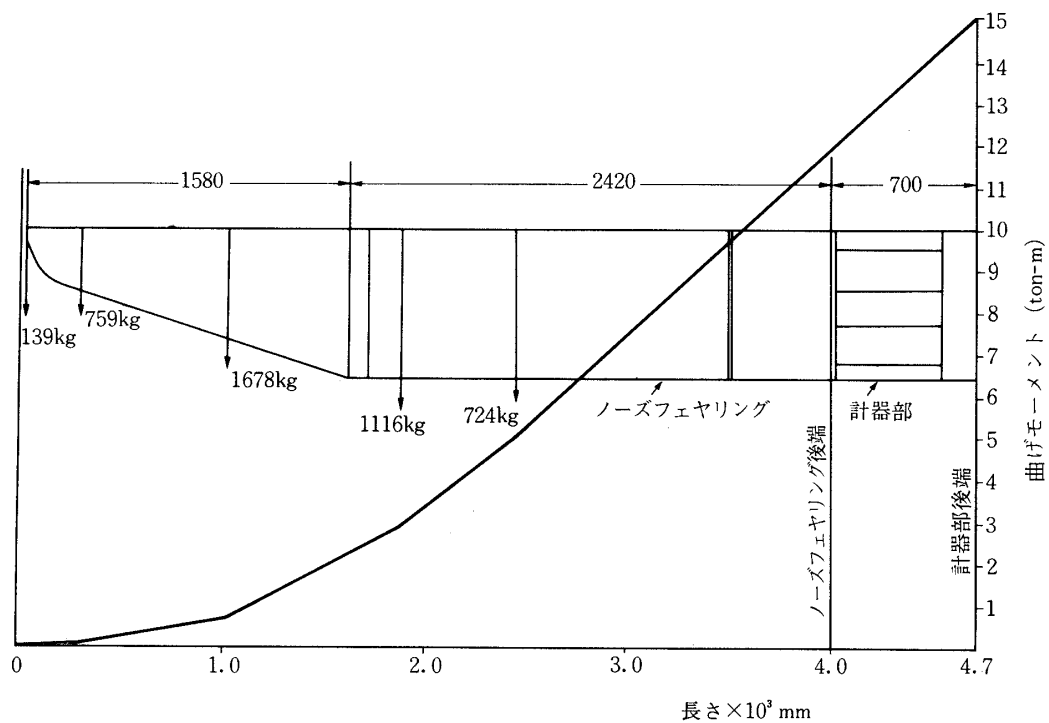


第 2 図 ノーズフェアリングの曲げ試験

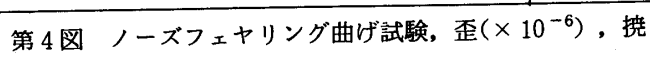
荷重はトーナメントにより 5 点に負荷し、最大 4.4 ton まで負荷した。最大荷重時の曲げモーメント分布を第 3 図に示す。この曲げモーメントは、ノーズフェヤリング後端では、設計荷重の 15% 増しとなっている。最大荷重のときの歪、撓の測定結果を第 4 図に示した。

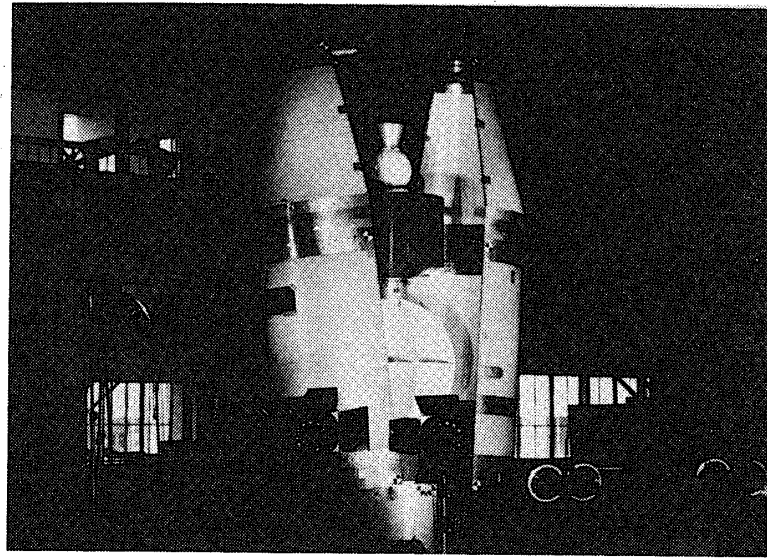
c. 機能試験（昭和 51 年 3 月） 開頭試験は第 5 図のようにノーズフェヤリング内に実機と同一形状の 3 A モータ、衛星接手、ダミー衛星（ドイツ・コネクター付き）等を納め、第 2 段計器部と結合して試験を行った。

開頭状況は、高速度カメラ、ビデオテープに収録した。これらの解析結果より正常な平行開頭が確認された。またドイツ・コネクター引抜きも異常がなかった。



第 3 図 曲げモーメント分布





第5図 開頭試験

3. キックモータ

衛星を科学観測上の所定の軌道に投入するために、M-3H-1・2号機では、チタニウム・ケースのキックモータ(A)を、3号機では、カーボン繊維フィラメント・ワインディング(FW)による直径700mmのキックモータ(B)を搭載することになったので、各々のケースの試作と、これを用いた地上燃焼試験を行った。

1) キックモータ(A) [6] [7]

新規開発の内径380mm、一般部板厚0.85mmの6Al4Vチタン合金製球形モータケースである。

M-3Aモータと同様に機械加工された半球を溶接して製作しているが、前後対称のボスを有する形とし、製造コストの低減をはかっている。第6図にキックモータ(A)ケースの主要寸度を示した。また、軽量化のため、各部の最大応力を極力一定となるよう最適化手法を用いて板厚分布の設計が行われており、モータケース重量は2.5kgであり、設計内圧 $60\text{kg}/\text{cm}^2$ に対する計算上の安全率は1.3以上が確保されている。第7図に応力分布計算例を示した。

本モータケースについては以下の地上試験を実施した。

- i) 地上燃焼試験(昭和51年3月): 最大内圧 $43\text{kg}/\text{cm}^2$ で最大歪 3000μ (一般部)
- ii) M-3H-1用器材による水圧試験(昭和51年6月): 最大内圧 $55\text{kg}/\text{cm}^2$ で最大歪 3674μ (一般部)
- iii) M-3H地上燃焼試験用器材による水圧試験(昭和51年3月): 最大内圧 $55\text{kg}/\text{cm}^2$ で最大歪 3981μ (一般部)

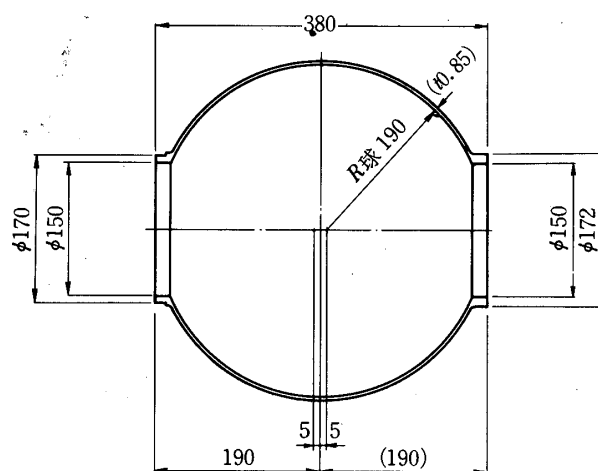
2) キックモータ(B)

新規開発の内径700mmのモータケースである。カーボンフィラメント・ワインディングにより軽量化を図っている点が大きな特徴である。

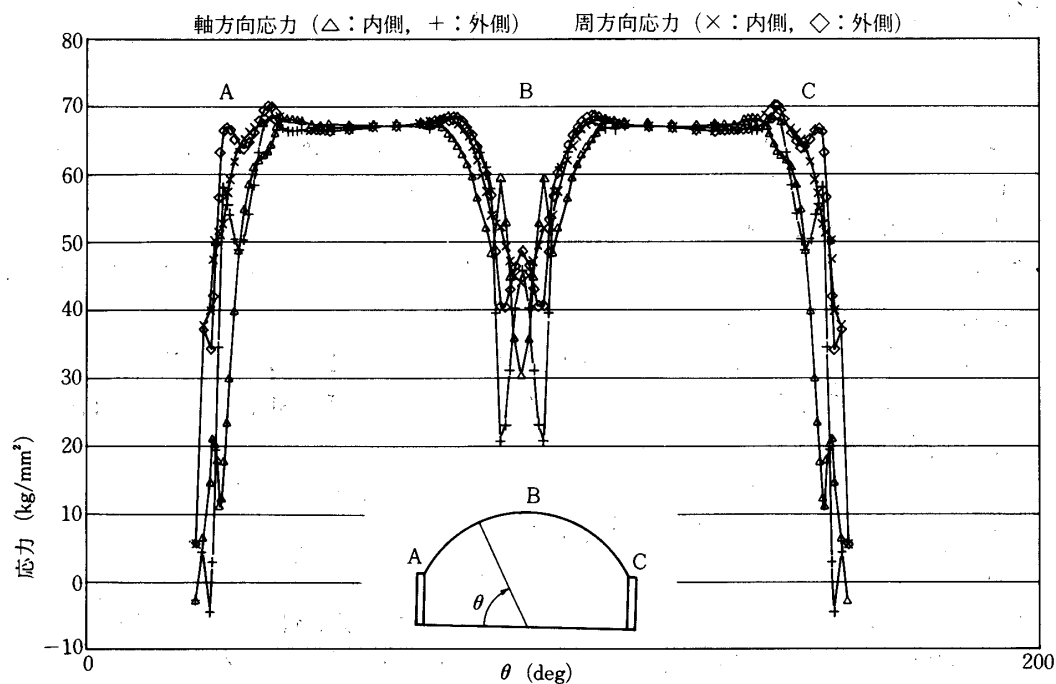
モータケース重量は14.25 kg, 設計内圧 55 kg/cm^2 に対する計算上の安全率は1.36を確保している。第8図にキックモータ(B)の主要寸度を示す。

本モータケースについては以下の地上試験を実施した。

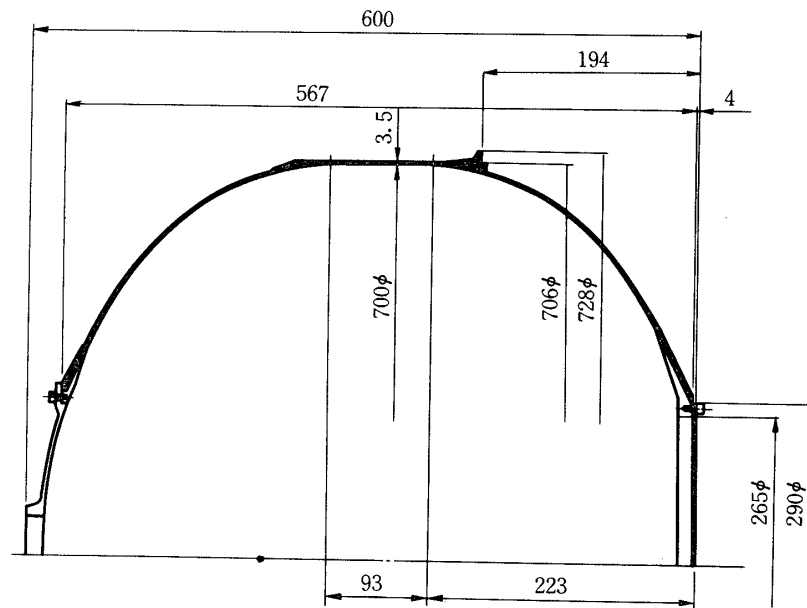
- i) 圧縮および曲げ強度剛性試験(昭和52年4月): 最大圧縮荷重1650 kg (15G相当)で最大歪は 765μ , 最大曲げ荷重 574 kg-m (KM接手との結合部)で最大歪は 1047μ であった。曲げ試験での最大撓は2.3 mm (モータケース先端)



第6図 キックモータ(A)モータケース主要寸度



第7図 キックモータ(A)チャンバ応力分布



第8図 キックモータ(B)モータケース主要寸度

- ii) 水圧破壊試験(昭和52年5月): 破壊圧は 76.1 kg/cm^2 (設計最小破壊圧 75 kg/cm^2) で破壊はケースのノズル側 CFRP 部の口金に近い部分で起こった。破壊に至るまでは水漏れ降圧等なく, ライニングによる気密は十分であった。

4. 接 手

キックモータの搭載に伴い接手の新規開発を行い, また衛星の大型化に対応して衛星接手の強化を行った。その概要を以下に列記する。

4.1 1・2号機用キックモータ・衛星接手

この接手はM-3H-1・2号機用に開発された接手で, キックモータと衛星とを結合する接手である。

構造はアルミ合金材を用いたシェル構造で胴部の最小板厚を1.5mmとして全体の重量を1.8kg以下におさえてある。全長は88mm, 外径は182mmで, M型ロケットでは最小の接手である。安全率は1.2以上確保されている。

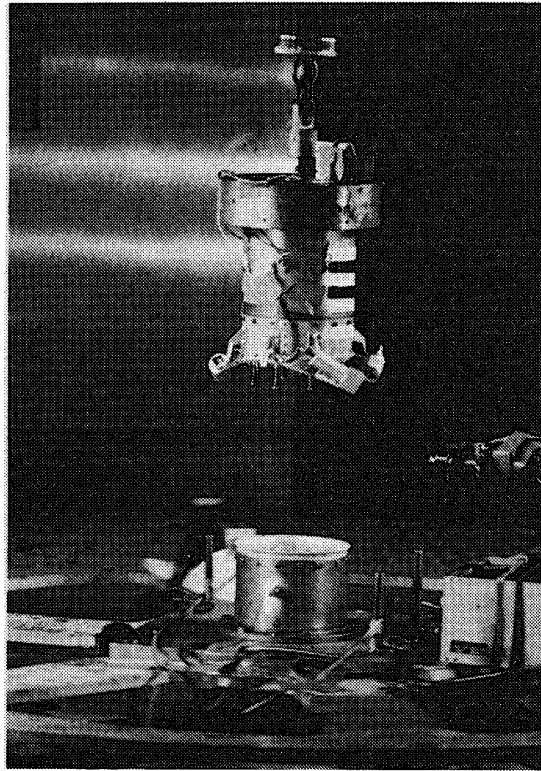
分離はマルマンクランプと8φmmのセパレーション・ナット2個(ダブル)の組合せで行われる[3][5]。第9図に分離後の状態を示した。

1) 荷重

キックモータの最大軸加速度27G, キックモータの最大横加速度7Gを想定して, 軸力1588kg, 曲げモーメント105kg-m(分離面)を設計荷重としてある。

2) 地上試験

- a. M-3H地上試験用器材による曲げ強度剛性試験(昭和50年12月)

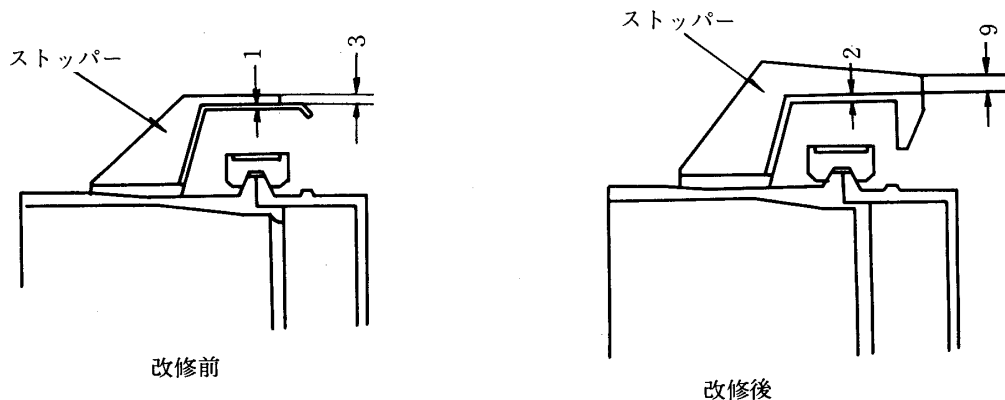


第9図 キックモータ・衛星接手分離試験

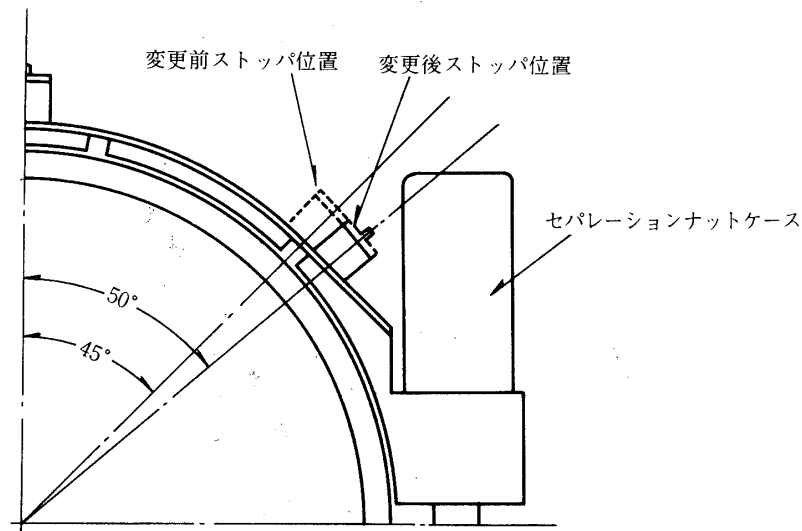
最大曲げモーメント：113 kg - m (分離面)，最大歪：1434 μ (応力 10.7 kg/mm²)

b. M-3H 地上試験用器材による分離試験 (昭和 50 年 12 月)

- i) マルマンバンド保持用ストッパーの変形があり，マルマンバンドが開放時許容範囲外まで広がった．第 10 図のように補強後再試験を行った．
- ii) 補強後の試験においてストッパーの強度は十分であることが確認できた．
- iii) マルマンバンド開放状態での衛星とのクリアランスが微少のため，第 11 図のように位置変更を行った．
- iv) ストッパー位置変更後の試験においては，マルマンバンドと衛星とのクリアランスは十分である．(23 mm 以上)



第 10 図 ストッパーの改修



第11図 ストップの位置変更

4.2 1・2号機用第3段モータ・衛星接手

この接手は衛星と第3段モータを結合する接手である。

構造はアルミ合金材を用いたシェル構造で、M-3C型と同様の全長150mm、胴部外径302mmのマルマンクランプ型接手である〔3〕〔4〕〔5〕。衛星の大型化（約130kg）および新たにキックモータ（約60kg）を搭載したことにより、M-3C-3号機に比べ軸荷重で約2倍、曲げ荷重で約4倍へと荷重が増大した。これにより胴部の板厚を1.2mmから1.5mm、3Aモータとの結合ボルトを12個から24個に変更し強化を図り、さらに上段側重量増加に伴い分離用スプリング力を5.3kgから7.6kgへと強化した。

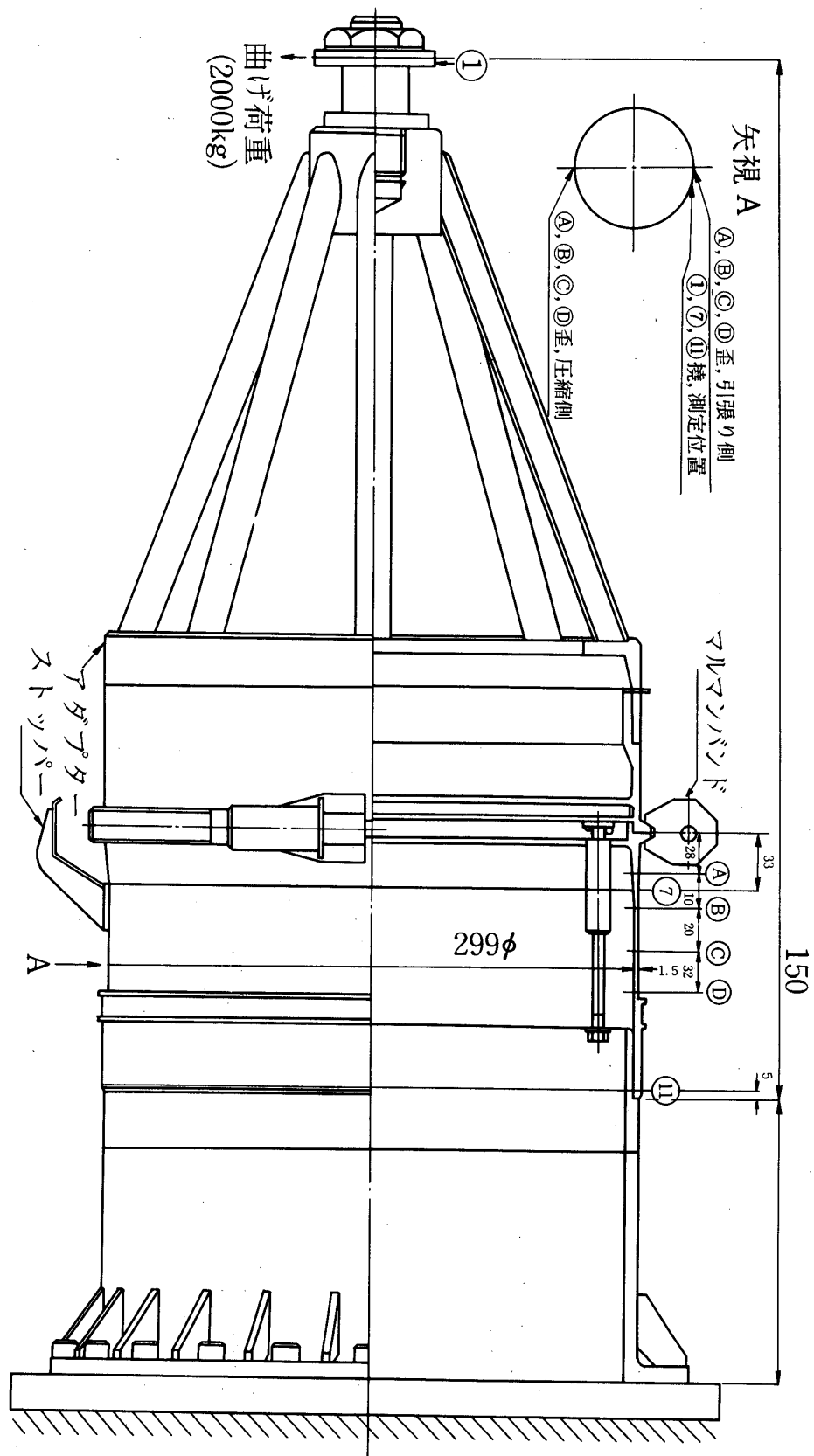
1) 荷重

最大軸加速度27G、最大横加速度はキックモータ7G、衛星5Gを想定して軸荷重5300kg（接手下端）、曲げ荷重800kg-m（接手下端）を設計荷重とした。これに対し1.4以上の安全率が確保されている。

2) 地上試験

a. M-3H用地上試験器材による曲げ強度剛性試験（昭和51年2月）

第12図に示すように供試体を片持で支持し、最大荷重2000kg（0.84ton-m（切離面））の横荷重をかけて、歪、撓の計測を行った。最大歪はヨー取付窓付近で5659 μ 、一般部（胴部）で2376 μ であった。ヨー取付窓明部周辺に応力集中の発生が認められたため4mmのアルミ板で裏あてをして補強を行い、その強度が十分であることを確認している。最大荷重のときの胴部の歪を第2表に示した。また、最大撓は先端①で4.45mm、接手の前後⑦、⑩間で0.12mmであった。



第12図 第3段モータ・衛星接手曲げ試験, 歪, 撓測定位置

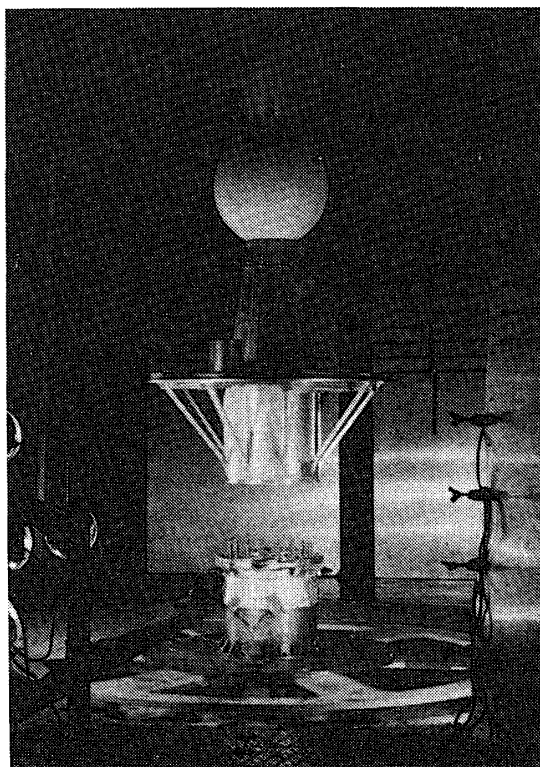
第 2 表 胴部の歪

	荷重方向	軸方向歪 $\times 10^{-6}$	円周方向歪 $\times 10^{-6}$	応力 kg/mm^2
A	引張り側	- 1189	666	10.99
	圧縮側	- 1730	—	- 13.65
B	引張り側	544	486	3.15
	圧縮側	- 2376	359	- 19.74
C	引張り側	49	- 8	- 0.4
	圧縮側	- 1261	674	- 11.58
D	引張り側	179	133	1.1
	圧縮側	- 1378	- 760	- 9.10

b. M-3H 用地上試験器材による分離試験 (昭和 51 年 2 月)

分離試験の状況を第 13 図に示す. 上段側にダミーウェイトを搭載し, スピンテーブルの上に取り付け, 静止および 2 Hz のスピンの下で試験を行った.

高速度カメラで分離状況を見ると分離は正常で D-SUB・コネクターが分離に与える影響はほとんどなかった.



第 13 図 第 3 段モータ・衛星接手分離試験

4.3 キックモータ(B)・M3A 接手

キックモータ(B)はCFW(カーボン・フィラメント・ワインディング)であって、チャンバの剛性が強くなく、なお大開口比のノズルを採用しているので、ノズル付根を接手がつかむのは適当でなく、赤道部をつかまざるを得ない。この条件下で細村が考案したのが第14図の鳥カゴ型接手である。

円筒状接手構造のうち、円周方向等分割位置に配した結合ビスから伝えられる力を最も有効に伝える部位を残し、他を削り取るという思想〔9〕で概念設計し、これに加工性を考慮し、設計、試作したものが第14図の外観である。結果として液水タンク構造のアイソグリップ構造に似たものになっている。

1) 設計荷重

最大軸荷重：5760 kg (機軸方向加速度 15 G 相当)

最大曲げ荷重：1.98 ton-m (横加速度，衛星：7 G，衛星+キックモータ接手：7 G，キックモータ(B)：5 G 相当)

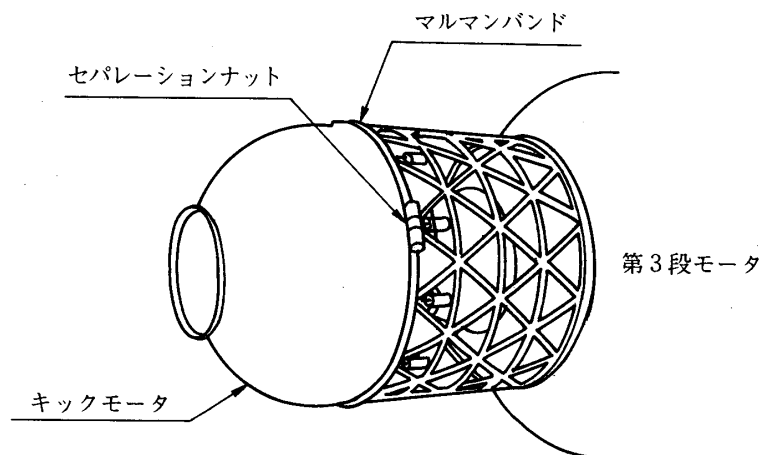
2) 地上試験

M-3H-3号機用地上試験器材を用いて強度，剛性，分離試験を行った(昭和52年4月)

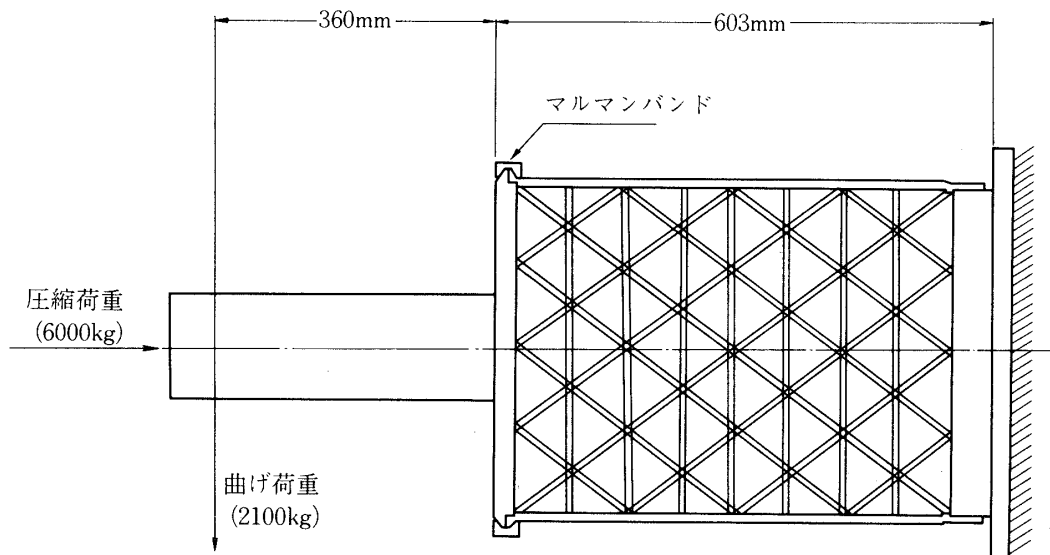
a. 強度剛性試験

第15図に示すように供試体を片持で支持し、曲げおよび圧縮試験を行った。圧縮荷重は最大6000 kg，曲げ荷重は最大20.22 ton-m(接手後端)まで負荷した。

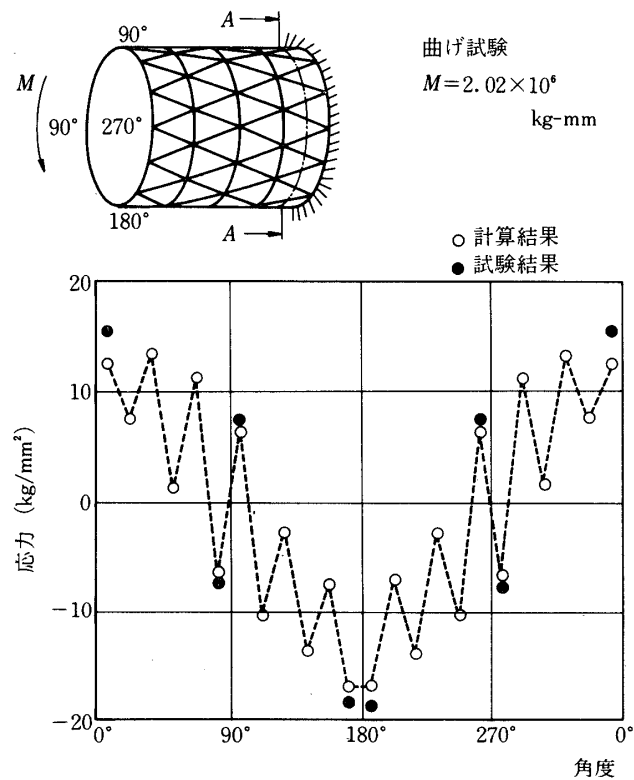
最大歪は最大圧縮荷重のとき、周方向メンバーで 1615μ (応力 $=11.3\text{ kg/mm}^2$)，最大曲げ荷重のとき、機軸方向メンバーで 2637μ (応力 $=18.5\text{ kg/cm}^2$)発生した。曲げ試験のとき測定した歪のデータから応力を算出し、その一例を計算結果と併せて第16図に示した。計算結果と実験結果は良く一致している。最大変位量は圧縮試験時機軸方向に1.05mm



第14図 キックモータ(B)・M3A 接手



第 15 図 キックモータ(B)接手, 強度, 剛性試験



第 16 図 断面A-Aにおけるリブの応力

縮み、半径方向に 0.47mm ふくらんだ。曲げ試験時には接手先端で 2.86mm 撓んだ。

b. 分離試験

第 15 図に示した供試体をスピントーブルの上に取り付けて静止および 2 Hz のスピンの下で分離試験を行った。

分離時の計測は、高速度カメラ、ビデオテープ、分離速度計で測定した。分離速度は 0.91 m/sec で計算値 (1.0 m/sec) とほぼ一致した。高速度カメラで分離時の状況を見るとマルマンバンドの広がり、および押し出しスプリングの作動も正常であった。

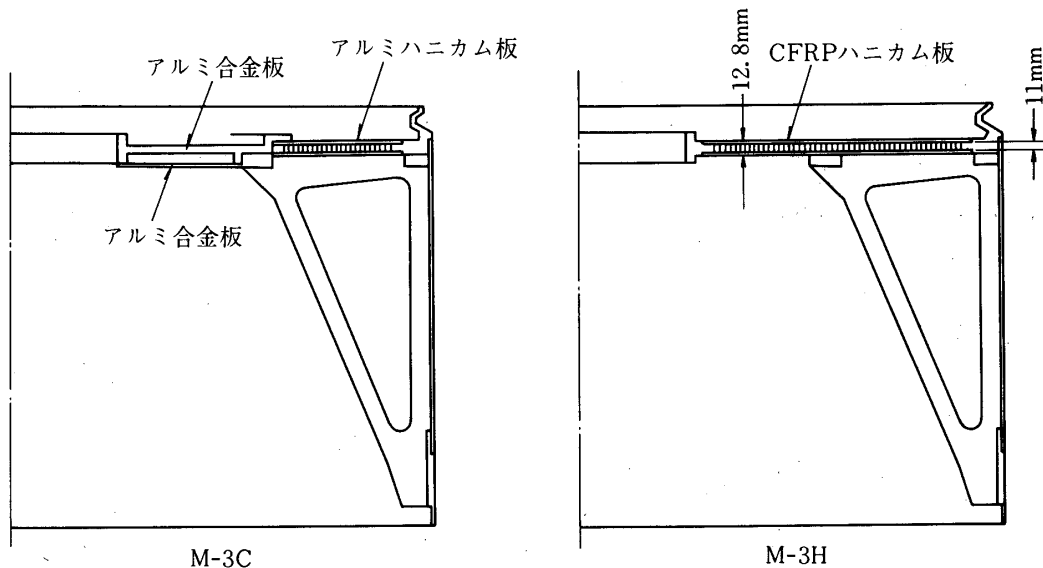
5. 第 2 段計器部 [8]

計器部は主としてアルミ合金の骨組、外板、および計器搭載用 CFRP ハニカム板より構成され、各種搭載計器を収納するとともに第 3 段モータおよびノーズフェヤリングを支持する。

M-3H では計器搭載用上板を M-3C のアルミハニカム板から、比強度、比剛性の高い CFRP ハニカム板に変更し、約 6 kg の軽量化と振動特性の若干の向上を計った。概略を第 17 図に示す。また、M-3C-3 ではノーズフェヤリング組付後でも取り外せる機器は 43 個中 24 個であったが、M-3H-2 では各機器の取り付け方法および配置等を考慮し、騒音センサーを除く機器全部が取り外し可能となっている。

1) 荷重

a. 2・3 段から入る荷重



第 17 図 計器取付板概略

軸荷重：キックモータ，衛星，3 A モータの最大軸加速度 9.5 G

横荷重：最大横加速度として，キックモータ 7 G，衛星 5 G，3 A モータ 3 G を想定して
軸荷重 13.9 ton，曲げモーメント 6.26 ton-m (PL 部前端面) としてある。

b. ノーズフェヤリングから入る荷重

横荷重：最大動圧時 (1.4 kg/cm^2) の最大迎角を 4° ，遷音速時 ($q = 0.68 \text{ kg/cm}^2$) の最大迎角を 6° として曲げモーメント 10.3 ton-m (PL 部前端面) を設計荷重としてある。

2) 地上試験

下記の試験を行い強度，剛性，振動特性を確認している。

a. 振動試験 (昭和 50 年 6 月)

M-3C 地上試験器材の計器取付板を CFRP ハニカム板に改造し，振動試験を実施した。
一次共振特性を M-3C 型と比較して第 3 表に示す。

第 3 表 一次共振特性

	CFRP 板	3C 型
一次共振振動数	72 Hz	103 Hz
共振倍率 (1 G)	16	21

振動数が M-3C 型に比べやや低いことから，実機ではハニカム板を 9.8 mm から 12.8 mm へ変更した。

b. 曲げ強度試験 その 1 (2・3 段接手からの荷重に対する強度試験) (昭和 50 年 6 月)
地上試験器材 (CFRP ハニカム板 9.8 mm) を用いて曲げ試験を実施した。

2・3 段接手を介して，片持曲げて最大荷重 6500 kg (最大曲げモーメント 7.12 ton-m (B₂PL 部前端面)) を負荷した。このときの最大歪は 1130μ (ステー部) (応力 = 8.1 kg/mm^2)，最大撓は 8.74 mm (先端) であった。

c. 強度試験 その 2 (ノーズフェヤリングからの荷重に対する強度試験) (昭和 51 年 2 月)

ノーズフェヤリング強度剛性試験の際，実機 B₂PL を使用し，最大荷重 11.8 ton-m (PL 部前端面) まで負荷した。

6. 2・3 段接手 [8]

マルマンクランプ型開傘式 (ペタル) 接手である。M-3H-1・2 号機では，M-3C に比べ荷重の増加も比較的少く M-3C からの変更はない。M-3H-3 号機では KM(B) の搭載等により，2・3 段接手に作用する荷重が増大 (M-3H-1，2 号機に比べ約 1.6 倍) したため，ペタル部の板厚を 2 mm から 3 mm へ増す等の強化を行った。本接手については昭和 52 年 11 月強度剛性試験を実施し，最大曲げ負荷 11.5 ton-m (接手下端) までの強度確認を行っている。

7. 1・2段接手 [8]

セパレーション・ナット型開傘式(トラス)接手である。M-3Cよりの最大荷重の増加は微少であり、十分な強度を有するのでM-3Cからの変更点はない。

8. M-13モータケース [3][8]

M-10モータケースの3セグメントから4セグメントに大型化し、全長が3060 mm伸び、これがM-10モータケースと本質的には変わらない。設計最大内圧は60 kg/cm²である。

9. あとがき

M-3H型ロケットの構造、機能の開発経過の概略について述べた。M-3HはM-3Cと比較して構造、機能上主として、ノーズフェアリングの延伸と開頭方式の改良、第2段計器部上板のCFRP化、M-13モータケースの1セグメント延長、キックモータケース(AおよびB)およびキックモータ接手の新規開発が主な相違点である。

これらの項目については、すべて地上試験によりその強度と機能の確認を行っている。この構造開発にあたっては植村益次教授、砂川恵教授、雛田元紀助教授のご指導をいただいた。設計、製作、試験のとりまとめは日産自動車宇宙航空部の方々が担当され、1・2段モータケースは三菱重工神戸造船所が担当されたことを付記して感謝の意を表します。

1979年11月22日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] 森 大吉郎: M-3C型ロケットの開発, 日本航空宇宙学会誌, 第23巻, 第257号(1956), PP. 328-339.
- [2] 森 大吉郎, 橋元保雄: M-3C型ロケットの構造について, 第16回構造強度に関する講演会講演集(1974), PP. 31-34.
- [3] 中野 旭, 橋元保雄: ロケットにおける接合と分離, 日本機械学会誌, 第76巻, 第651号(1973), PP. 359-365.
- [4] 中野 旭, 橋元保雄: M-4S型の構造と機能, 宇宙航空研究所報告, 第11巻, 第1号(1975), PP. 131-137.
- [5] 橋元保雄, 川島 隆: M-4S型ロケットの機能装置とその地上試験, 第15回宇宙科学技術講演集(1972), PP. 49-52.
- [6] 森 大吉郎, 中野 旭: チタニウム合金製球型ロケットモータケースの試作, 宇宙航空研究所報告, 第7巻, 第4号, (1971), PP. 761-772.
- [7] T. Yasaka, A. Nogaki, M. Nakanose, T. Hosomura: Development of a Large Spherical Rocket Motor Case from Ti-6Al-4V Alloy, Proc. 10th Int. Symp. Space Tech. Sci. (1973), PP. 297.
- [8] 橋元保雄, 八坂哲雄, 小野田淳次郎: M-3Cの構造と機能, 宇宙航空研究所報告, 第14巻第1号(B)(1978), PP. 53-76.
- [9] 細村建夫: 有限要素法による最適形状設計, 第16回構造強度に関する講演会講演集(1974), PP. 29-30.