

# M-V 型ロケットモータケースの開発

## Development of Motor Case for M-V Rocket

技術本部 森 昌彦\*<sup>1</sup>  
 神戸造船所 西田稔夫\*<sup>2</sup> 久利修平\*<sup>3</sup>  
 名山理介\*<sup>4</sup>  
 文部省宇宙科学研究所 小野田淳次郎\*<sup>5</sup> 栗林一彦\*<sup>6</sup>

宇宙科学研究所が開発中の M-V 型ロケット（直径 2.5 m、重量約 140 t）は、全段固体燃料の 3 段式ロケットである。そのモータケースは、ロケット構造系の大きな要素で衛星打上げ能力の向上のため高い比強度材料の採用に基づく軽量化が要求される。当社は、本ロケットの第 1 段、第 2 段モータケースの製作を担当し新開発の超高張力マルエージング鋼を採用するとともに新たな工作方法を開発してモータケースの大型・軽量化を達成した。その成果として、モータケースの軽量化性能指数  $PV/W \geq 5.2 \text{ km}$  を得た。これは従来機 M-3 S II 型ロケットの 3.5 km に比べて大きく性能向上（約 1.5 倍）させるものである。

The M-V rocket (diameter 2.5 m weight 140 tons) developed by the Institute of Space and Astronautical Science is a medium class of 3-stage rocket, with all the stages using solid propellant. Its motor casing, above all, plays a major role in the rocket's structure, and is required to be light to increase the weight of satellites, that can launched, by employing a material of high specific strength, MHI for example, manufactures the 1st and 2nd stage motor cases, and recently developed a new way to maximize their capacity and minimize their weight by introducing a newly-developed maraging steel with a high tensile strength. As a result of this development, we have achieved a performance index value ( $PV/W$ ) of 5.2 km. This is a greatly improved, performance when compared with the 3.5 km of the present M-3 SII rocket.

### 1. ま え が き

ロケットの高性能化すなわち衛星打上げ能力向上の一環としてロケット構造系の重量軽減化が強く要求される。そのモータケースは、ロケットの最大の構造要素であるため重量の軽量化は最も期待されることである。固体ロケットの場合モータケースは、内部で推進薬を高圧で燃焼させる圧力容器としての機能があり、その内圧に耐える強度が要求される。

モータケースの軽量化要求を満足させるため、従来の実績を踏えて新開発の高い比強度材料として超高張力鋼（マルエージング鋼）を採用し、その材料（母材）の特性を生かす溶接（EBW）施工技術の開発を行うこととした。

一方、重量軽減化設計として鏡部ボス、結合フランジ部など構造不連続部の最適形状設定を確率 FEM 解析手法を用いて徹底して行い、厚肉部のぜい肉削減を図ることとした。

また、従来のモータケース工作方法はコスト低減化、工期短縮の観点からそのまま大型薄肉構造物としての本モータケースに適用できず、新たな工作方法を開発、実用化することとした。

さらに、これら高強度材料（溶接部を含む）特有の遅れ破壊に対する強度保証として実使用環境模擬試験を行い、信頼性を確保することにした。

### 2. モータケースの概要

M-V 型ロケットは、図 1 に示すような全長約 31 m、重量約 140 t の全段固体燃料の 3 段式ロケットで地球低周回軌道（200 km 上空）に 1.8 t の衛星を打上げる能力を持っている。その第 1 段及び第 2 段ロケットモータケースの諸元を表 1 に示す。

また、モータケースの形状、寸法を図 2、3 に示す。これらに示すサイズは固体ロケット用モータケースとして、国内最大級の規模である<sup>(1)</sup>。

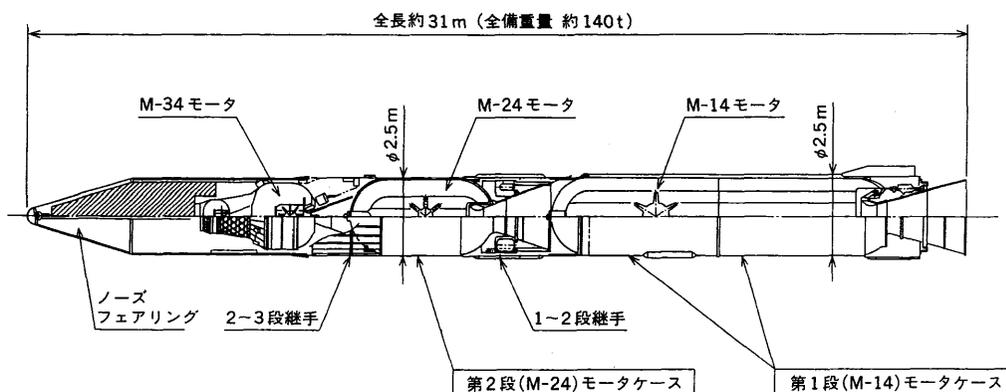


図 1 M-V 型ロケット M-V 型ロケットの全体を示す。  
M-V rocket

\*1 高砂研究所次長 \*4 プラント工作部重機器工作課長  
 \*2 機械・環境装置技術部主務 \*5 飛翔体構造工学部門 教授 工博  
 \*3 プラント工作部工務課長 \*6 高強度材料工学部門 教授 工博

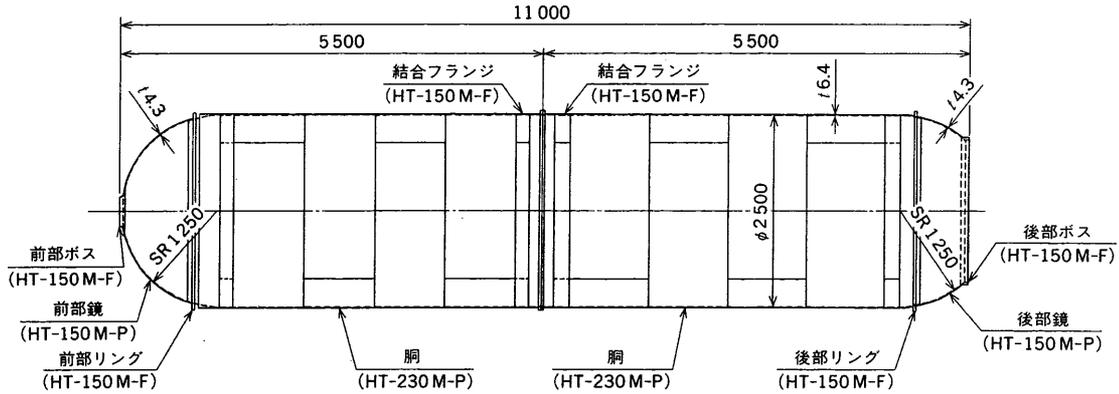


図2 第1段 (M-14) モータケース モータケースの概略を示す。  
1st stage (M-14) motor case

表1 M-V型とM-3S II型モータケースの諸元(性能)比較  
M-14, M-24 motor case in comparison with M-13, M-23

機種	M-V		M-3S II	
	第1段 M-14	第2段 M-24	第1段 M-13	第2段 M-23
使用段 チャンバ名				
全長 (m)	11.0	4.76	13.28	4.82
最大径 (m)	2.51	2.51	1.41	1.41
内容積 V (m³)	50.3	19.2	19.6	6.73
最大使用内圧 P (kgf/cm²)	60	60	60	55
最小板厚 (mm)	6.4	5.8	3.9	3.5
チャンバ重量 W (kgf)	<5 748	<1 839	<3 424	<830
材料	胴 HT-230 M 鏡 HT-150 M	胴 HT-230 M 鏡 HT-150 M	胴 HT-210 鏡 HT-140 N	胴 HT-210 鏡 HT-140 N
PV/W (km)	>5.2	>6.2	>3.4	>4.5

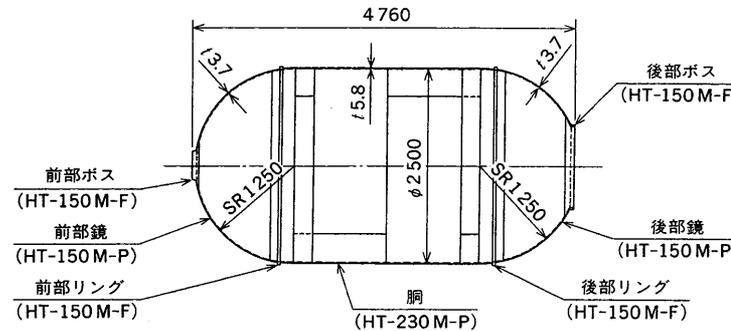


図3 第2段 (M-24) モータケース モータケースの概略を示す。  
2nd stage (M-24) motor case

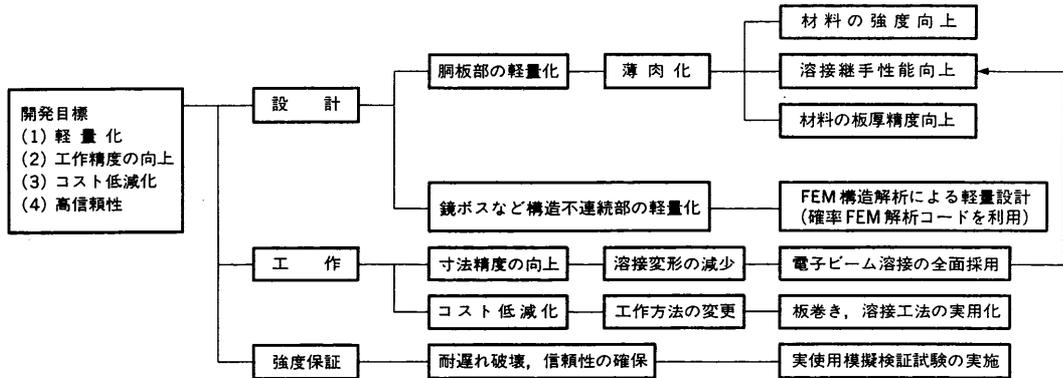


図4 開発目標 ロケットモータケース開発目標と展開手段検討フローを示す。  
Item of research and development

### 3. モータケースの開発目標とその展開

モータケース開発の命題として特に軽量化、飛しょう安定要求からくる真円・真直度など寸法精度の向上、コスト低減化及び信頼性の確保が挙げられる。これらの開発重点課題を踏まえ図4に示すように開発目標を設定し具体的展開を行った。

#### 3.1 材料の強度向上

モータケース胴部の使用材料として従来のM型ロケットに使用しているマルエージング鋼 HT-210<sup>(2)</sup>は、安定性・信頼性が高く実機打上げに多くの実績を持つものである。しかしながら軽量化の点から若干の強度向上が必要となり、Co, Ti など化学成分系を変更し新規に開発したマルエージング鋼 HT-230 M を採用した。新材料の化学成分及び機械的性質を表2に示す。表中の機械的性質は熱処理 (2次溶体化: 820°C×3h 及び時効処理:

520°C×10h) 条件温度設定許容値 (±15°C) を考慮した供試体から採取した実証値を示す。この材料は、HT-210 の優れた機械的性質を損なわない範囲で強度向上を図ったものである。

#### 3.2 溶接継手性能の向上

HT-230 M は溶接性の良好な超高張力鋼であるが、さらに信頼性を高めるため全溶接部に電子ビーム溶接 (EBW) 工法の採用と熱処理条件の最適化を徹底して行い表2に示すように母材相当の継手強度を確保した。

これに伴い従来溶接継手強度低下 (90~95%) により母材板厚に余肉を有していたが、この余肉が削除可能となりモータケースの薄肉軽量化に寄与できるものとなった。

#### 3.3 構造不連続部の軽量化

図2, 3に示すモータケースの鏡ボス部、各段間継手リング部、結合フランジ部などの構造不連続部の軽量化は、確率FEM解析

表2 HT-230 M の特性  
Mechanical and chemical properties of HT-230 M

項目	機械的特性						主要化学成分 (mass %)							
	母材			溶接部 EBW			C	Si	Mn	Ni	Co	Mo	Ti	Cr
	0.2%耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	破壊靱性値 (kgf/mm <sup>3/2</sup> )	0.2%耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	破壊靱性値 (kgf/mm <sup>3/2</sup> )	≤0.005	≤0.07	≤0.07	17.5~ 18.5	10.0~ 11.0	4.7~ 5.3	0.50~ 0.70	≤0.50
設計設定値 (MIL-B 値を クリアする値)	≥170	≥180	≥200	≥160	≥180	≥148	(参考) HT-210							
実証平均値 (最低値)	186 (175.5)	194.5 (185.4)	237.2 (207.4)	185.3 (184)	191.5 (184)	175.3 (150.4)	C	Si	Mn	Ni	Co	Mo	Ti	Co
							≤0.005	≤0.05	≤0.07	17.5~ 18.5	8.3~ 9.3	4.7~ 5.3	0.40~ 0.60	≤0.50

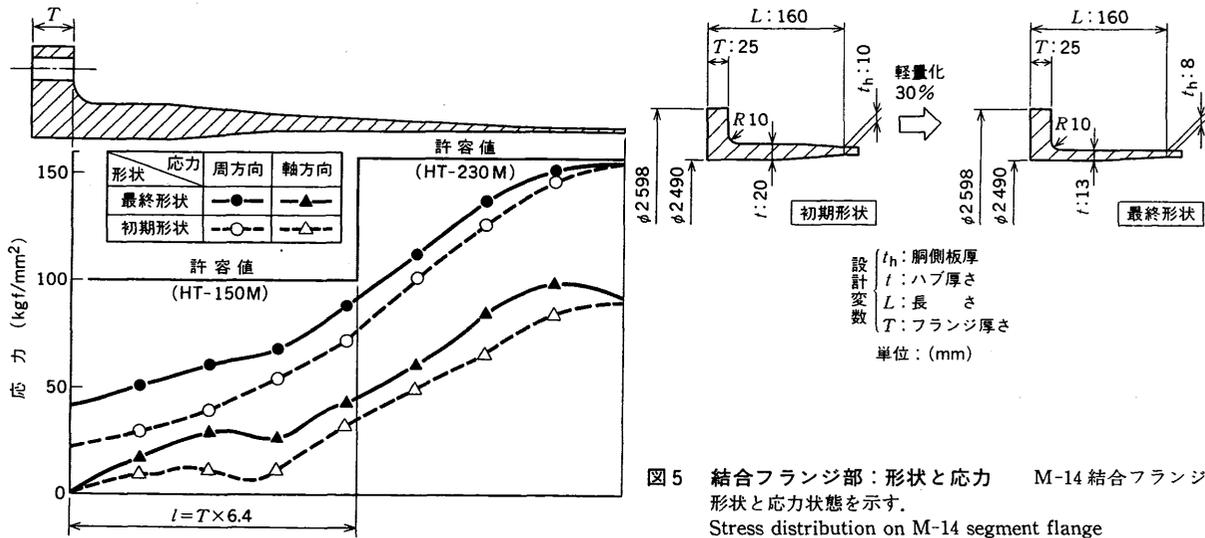


図5 結合フランジ部：形状と応力 M-14 結合フランジ  
形状と応力状態を示す。  
Stress distribution on M-14 segment flange

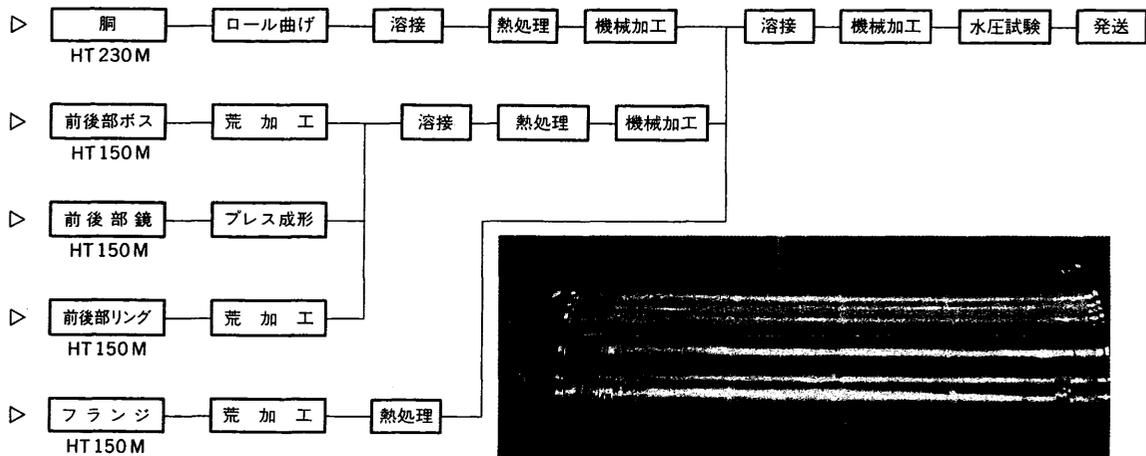
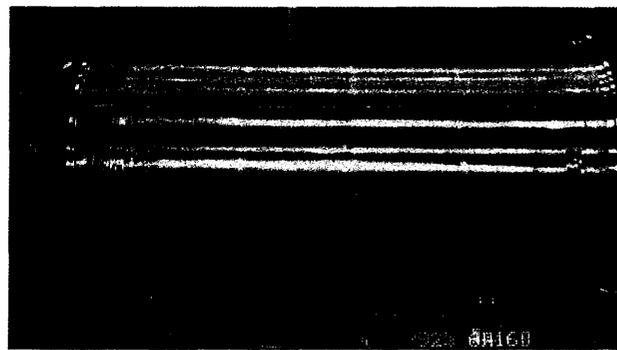


図6 第1段 (M-14) モータケースの製作フロー  
モータケースの製作フローチャートを示す。  
Flow chart of manufacturing process



コードの持つ機能の一つである設計変更に対する応力感度を利用して、可能な限り余肉を落とした最適形状を求めたこととした<sup>(3)</sup>。

図5に結合フランジ部の解析例を示す。

設計変数としてハブ板厚： $t$ 、胴側板厚： $t_h$ 、フランジ厚さ： $T$ などが考えられ、これらの設計変数に対する応力評価点での応力の変化度合  $d\sigma/d\alpha$  ( $\sigma$ ：評価点の応力、 $\alpha$ ：設計変数) を求め重量及び工作性を考慮して形状、板厚を決め、その後最終形状寸法について詳細 FEM 解析を実施し、作用応力が許容値内であることを確認している。図5が本手法で求めたフランジ形状寸法で従来設計法で求めた初期形状寸法の応力レベル(破線)に比べ最終形状寸法での応力レベルは実線のように高応力になっており、30%フランジ部の重量を軽減することができた。

### 3.4 工作方法の変更改善

従来胴部の工作方法は、厚板(11~15 mm)プレス成形→溶接→削り出し機械加工 という加工工程であった。

モータケースの大型化に伴うコスト低減化の一環として今回の工作方法は 薄板(5.8~6.4 mm)板巻き→溶接 という工程の変更を行いプレス加工厚板材料の溶接及び削り出し機械加工工程の削除を図った。

図6に実用化した製作フローの代表例(第1段モータケース)を示す。第1段ロケットモータケース(図2)の胴部は、新開発の HT-230 M の薄板を板巻きし溶接して円筒に作られる。また、胴部より応力レベルの低い前後部の鏡部、リング部及びセグメント結合フランジ部は、加工性の良い HT-150 M を採用し鍛造品

やプレス成形品を溶接して切削機械加工により製作する方法とした。

第2段ロケットモータケース (M-24) の場合は、図3に示すように全長4.7 m、内径2.5 m、胴部板厚5.8 mmで一体型であることを除き製作フローなどM-14と同様である。

### 3.5 モータケース強度保証の考え方

ごく少量の水素を含む鋼に定荷重を加えておくことある時間経過後ぜい性的な破壊を起こす。これらの破壊現象を遅れ破壊と言う。

本モータケースに採用しているマルエージング鋼は140~150 kgf/mm<sup>2</sup>程度の降伏強さを超えると遅れ破壊が発生しやすい。このような破壊が発生する原因の一つにその内部に切欠き効果を与える欠陥を含んでいることが挙げられる。したがって材料は欠陥がなく健全であることが要求されるため本モータケースに対して非破壊検査の強化を図った。しかし、検出限界の不明確さ、長い溶接線に対するヒューマンエラーの問題などの理由により非破壊検査を全面的に信頼することは難しい。

これらを考慮して実使用状態を模擬した検証試験を行いモータケースの燃焼内圧に対する信頼性 (強度保証) を得ることとした。

#### 3.5.1 試験目的 (検証の考え方)

燃焼前に存在していた欠陥が燃焼時の環境・負荷・時間で遅れ破壊を生じないことを実機が受ける厳しい環境を模擬した試験によって確認することにより信頼性を確保することとした。

このためにモータケース供用前に実施される水圧試験の圧力が燃焼試験時の圧力の105%であることを考慮して試験片の破断荷重の96% (>100/105) 以上で一定時間 (>燃焼時間) 以上保持してもき裂の伸展がないことを試験により確認した。

試験の環境は打上げ時の最悪の環境及び飛しょう時の温度が100~150℃となることを考慮して135℃の飽和蒸気圧中とした。また、保持時間としては燃焼時間が100 sであることから燃焼時間の10倍の1000 s以上とした。

#### 3.5.2 試験方法

試験用供試体は、実機溶接継手相当の試験片 (厚さ4×幅18×長さ19 mm CT型) でノッチ位置は、溶接ポンド部位とした。

ただし、試験片は試験前水中に48 h以上保持して発錆 (はっせい) させ、その後直ちに試験を開始した。試験環境は135℃の飽和蒸気中とした。

試験の方法は、試験片を試験槽にセットし昇温を開始後、所定の試験環境に達した後、直ちに所定の荷重  $P$  を載荷した。試験片は1000 s以上保持後、除荷し試験槽から取出し12 h以上 (約16 h) 常温水中に保持した。

その後、再び同様の手順で  $P+\Delta P$  [ $(P+\Delta P)/P < 1.05$ ] の荷重を載荷する。このサイクルを破断まで繰返した。また、比較のために1回目の載荷後そのままの荷重環境で破断まで保持する試験を実施した。

試験結果の評価として、いずれの試験片においても遅れ破壊破面が見られなければ実機燃焼中に遅れ破壊き裂の伸展は生じないものと評価した。

#### 3.5.3 試験結果

すべての試験片の破断面を走査形電子顕微鏡 (SEM) 観察したが本試験によって破断した試験片の破面においては別途行った常温100%湿度中での遅れ破壊試験片で見られたような明りょうな粒界破面は見られなかった。したがって本試験で実施した環境・時間では遅れ破壊による欠陥のき裂伸展はないと判断した。

## 4. 開発試験結果と性能評価

- (1) モータケースは、ロケット地上燃焼試験に供される前に、単体で水圧試験を実施し、構造強度の評価を行った。最大使用内圧×1.05倍の荷重下においてモータケースは、異常な変形もなく、設計解析値に対して変位、ひずみ (応力) の実測値は一致しており設計、工作技術の妥当性が確認できた。耐圧試験に合格したモータケースは、推進薬を充てんされた後、宇宙科学研究所能代試験場において各段ロケットモータとして地上燃焼試験が行われ無事成功した。
- (2) モータケースの開発に当たって、最も重要な課題である軽量化についての性能評価は、以下に示すような性能指数で定義される。

モータケース性能指数:  $PV/W$  (m)

$P$ : 最大使用内圧 (kgf/m<sup>2</sup>)

$V$ : 内容積 (m<sup>3</sup>)

$W$ : モータケース重量 (kgf)

この性能指数が大きい値であるほど軽量で性能が良い压力容器すなわち、モータケースであると言える。開発した第1段・第2段モータケースの性能指数をまとめて従来のM型ロケット (M-3 S II) と比較して表1に示す。従来のM-3 S II型第1段ロケット (M-13) モータケースの性能指数の3.4 kmに比べてM-V型第1段のM-14モータケースでは、5.2 km以上で、大きく性能が向上している。また、第2段ロケットの場合においても、M-3 S II型で4.5 kmに対し、M-V型では6.2 km以上となっている。

## 5. むすび

従来のモータケース設計、製造技術を踏まえて新しい技術を織込み大型固体ロケットモータケース実用化の設計、製造技術の確立ができた。

現在、M-V型ロケット実機1号機用第1段、第2段のモータケースは、既に耐水圧試験 (1995年5月) も完了し、各段ロケットモータとして推進薬の充てんなど後工程の作業が行われ、1996年度の夏期に打上げが予定されている。

このM-V型ロケットモータケースは、製作系列から分類すると既存のM型ロケットの延長となるものの、軽量化を図る開発展開過程において、遅れ破壊対応などその設計、製造技術が、従来と異なり一つの技術的ステップアップを果したものと考えられる。今後は、確立した実績を踏まえさらに信頼性の高いモータケースを目指して取組んで行く所存である。

終りに臨み、本開発を行うに当たり超高張力マルエージング鋼 (HT-230 M) の研究開発と製造について川崎製鉄 (株) の御協力を得たことを付記し感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- (1) 小野田淳次郎ほか、M-V型ロケットの構造開発計画、第33回構造強度に関する講演会集 p.14~17
- (2) 松崎明博ほか、ロケットチャンバ用 HT 210 kgf/cm<sup>2</sup>級超高張力鋼の開発、日本金属学会、第25巻第6号 (1986) p.550
- (3) 森昌彦ほか、不確かさを持つ薄肉压力容器の確率有限要素法解析、日本機械学会論文集 A 編 第56巻、第526号 (1990) p.1455