

S-520 ロケットモータケースの試作

森 大吉郎・小野田淳次郎・今政 惇郎*
下山 仁一*・斉藤 一雄**・岡崎 洋**

(1981年6月24日受理)

Development of Motor Case for New Solid Rocket S-520

By

Daikichiro MORI, Junjiro ONODA, Toshiro IMAMASA
Toshikazu SHIMOYAMA, Kazuo SAITO
and Hiroshi OKAZAKI

Abstract: This paper presents the development of the motor case of the newly developed single stage sounding rocket "S-520". This rocket being a single stage rocket, in comparison with the previously developed K-9M and K-10 versions which are two stage, has the advantage of simplicity in operation and handling, and also of better range safety.

In the development of this sounding rocket of high performance, extreme weight saving, precise alignment and high reliability of the motor case were required.

Using the improved material, design technique using FEM structural analysis and new fabrication techniques such as EBW, the motor case which satisfies all the requirements has been developed and the burst test by hydropressure showed its high reliability.

* 三菱重工業(株) 技術本部高砂研究所

** 三菱重工業(株) 神戸造船所

概 要

本報告は新型の単段式観測ロケット「S-520」用モータケース開発研究の概要を述べたものである。

S-520は単段式であるので、2段式に比べて組立、発射の作業性が良く、また射場保安の上でも有理である。単段式でありながら、2段式のK-9M、K-10の効率的な代替機としてのねらいをもって開発されたS-520では、その高い性能を達成する為に、モータケースにも極度の軽量化、高い寸法精度及び高い信頼性が要求されたが、材料の改良と、最新の構造解析技術及び製造技術の適用により、要求を満すモータケースを開発することができた。

1. ま え が き

われわれはこれまで一般観測ロケットとして、S-210・S-310・K-9M・K-10・L-3Hの5機種を使用してきた。これらの機種は、観測目的に応じて広範な高度領域をカバーしてきたが、単段式ロケットでK-9M・K-10の到達高度範囲、すなわち200～400kmを実現出来ると、組立、発射作業及び海上保安等の観点から著しく改良されることになる。

S-520はこのように、K-9M・K-10の効率的な代替機としてのねらいをもって開発された。その最重要要素の一つとしてのモータケースについては、昭和53年度に設計を開始し、昭和54年1月に試作ができ、同年7月の地上燃焼試験、同年10月の水圧破壊試験による強度特性の確認等を経て、55年1月18日の1号機打上げに供され好結果を得た。ここではその研究開発の経過を報告する。

2. 要求された仕様と試作の方針

S-520ロケット開発のねらいは、従来のK-9M・K-10の2段ロケットと同一性能を単段で達成させようというもので、従ってモータケース部に対する要求も従来より厳しくなり、特に軽量化と、飛しょう安定性の点からの寸法精度の向上との2点が強く要請された。与えられた設計条件は次の通りである。

- (1) 内径：520 mm，全長：約5300 mm
- (2) 設計内圧：7.35 MPa
- (3) 真円度*・真直度**：2 mm 以下（従来3～3.5 mm）
- (4) 重量：190 kg 以下（鏡板を除く）
- (5) 内容量：1.10 m³

これらの条件のもとに、図1に示す試作開発の方針を策定し、新しい技術を積極的に導入して開発を推進した。すなわち、軽量化のため、材料の強度向上、安全率の見直し、溶接継

* 真円度：モータケース軸方向各位置に半径方向に変位計を当て、前後端機械加工部を基準にしてモータケースを回転させた場合に計測される変位計の振れ幅の最大値とする。

** 真直度：変位計をモータケース外側に半径方向に当て、機軸に平行に移動した場合の変位計の振れ幅の最大値。ここで機軸は前後端機械加工部を基準として定めるものとする。

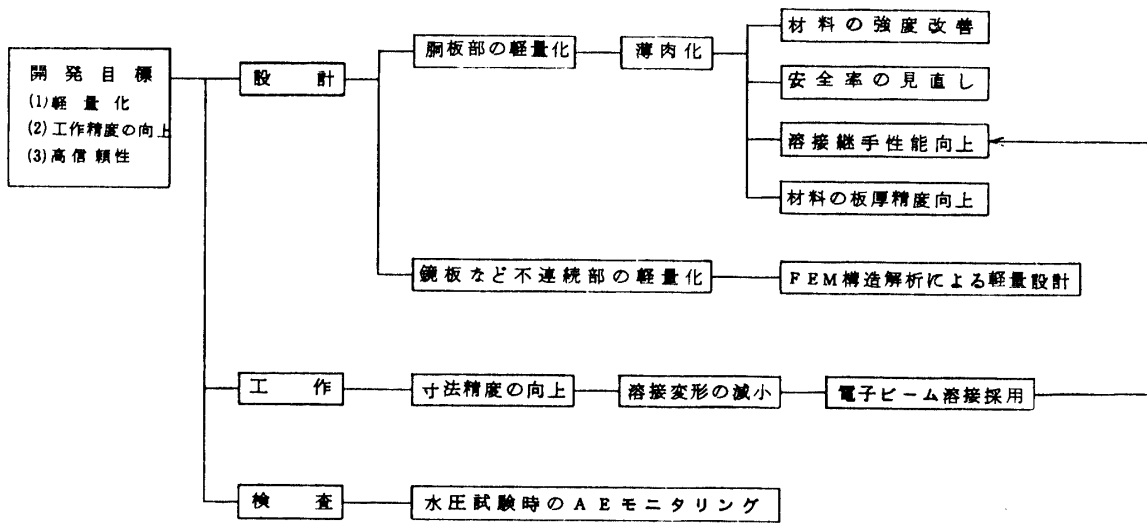


図1 開発の基本方針

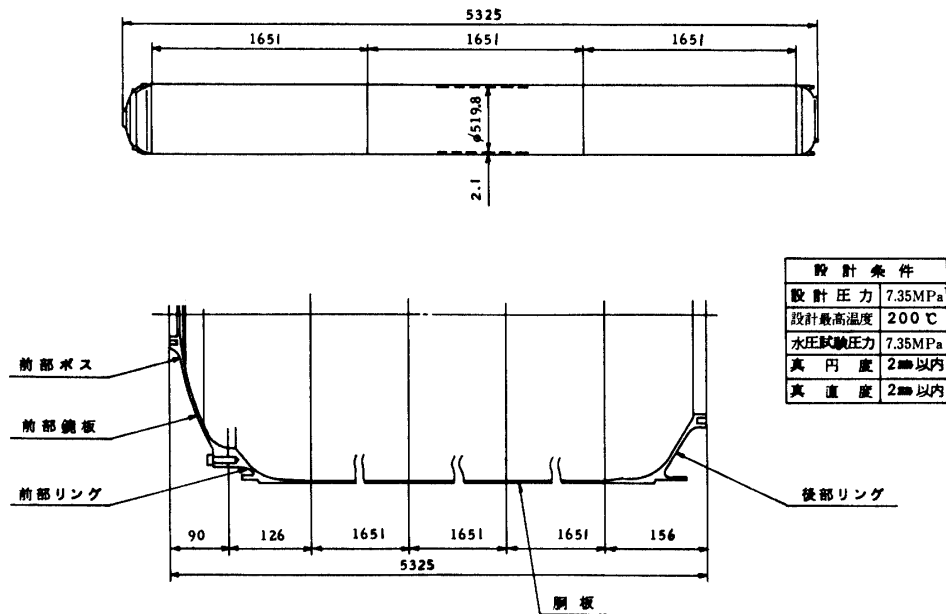


図2 S-520 モーターケース概略図

手性能向上及び材料の板厚精度向上による薄肉化を行うとともに、不連続部についてはFEM解析を用いて応力ピークを抑えた設計を行った。また精度を高めるために電子ビーム溶接の適用による変形の減少、および水圧試験時のAE (Acoustic Emission) 測定による特性の把握を図った。図2にモーターケースの概略を示す。

3. 材料の選定

使用材料としては、高強度と安定性、信頼性の点から、従来のラムダ型(L型)・カップ型(K型) ロケットに使用している 1370 MPa (140 kg/mm²) 級超高張力鋼 (HT-140 鋼) と、ミュー型 (M型) ロケットに使用している 1960 MPa (200 kg/mm²) 級 18% Ni マルエージング鋼 (HT-200 鋼) の 2 種類を候補として考えたが、加工性と経済性とから前者を選定した。ただし強度が従来の HT-140 鋼では要求条件を満足するには若干強度不足であるので、成分調整 (炭素当量を規制) を行い、靱性値を保った上で強度を向上させた改良材 HT-140 N 鋼を開発することとした。

4. 電子ビーム溶接

従来モータケースの溶接には自動 TIG 溶接を適用しているが、真円度・真直度の要求が厳しいので、溶接熱によるひずみの減少と、良好な溶接継手強度等の期待できる電子ビーム溶接 (EBW) を長手溶接継手に採用した。

表 1 HT 140 N 鋼母材及び EBW 継手の機械的性質の一例

材	料	後熱処理	平滑引張試験		NASA 切欠引張試験		延性試験 一様伸び (%)	破壊じん性試験 KQ $\frac{1}{2}$ (MPa mm ²)
			引張強さ (MPa)	破断位置	切欠強さ (MPa)	切欠強さ比		
HT 140N	母材	MB 処理	1391	—	1355	0.97	4.0	2873
			1402		1369	0.98	4.0	3099
	EBW 継手	MB 処理	1419	母材	1330	0.93	4.0	2864
			1426	母材	1371	0.96	3.9	3217
HT 140	TIG 継手	MB 処理	1315	母材	1310	—	3.2	—
			1300	母材	1317	—	3.5	—
	EBW 継手	MB 処理	1370	母材	1341	—	3.5	—
			1342	母材	1375	—	3.7	—

表 1 に供試 HT-140 N 鋼の母材及び EBW 継手についての機械的性質の一例を示す。同表中には、TIG 溶接と EBW での継手性能を比較するために、従来の HT-140 鋼での比較データ例も示した。HT-140 N 鋼の継手性能は、引張り強さ、一様伸び、破壊靱性等いずれの項目についても母材と同程度であり、また EBW 溶接が TIG 溶接より優れていることがわかる。

EBW 継手部の顕微鏡組織を図 3 に示す。溶接金属及びボンド部の結晶粒はやや大きい、炭化物が細かく分布した下部ベーナイト組織と、マルテンサイトが一部混合した組織を呈しているのが分かる。また、図 4 に溶接部の硬さ分布の一例を示すが、溶接部も母材とほぼ同

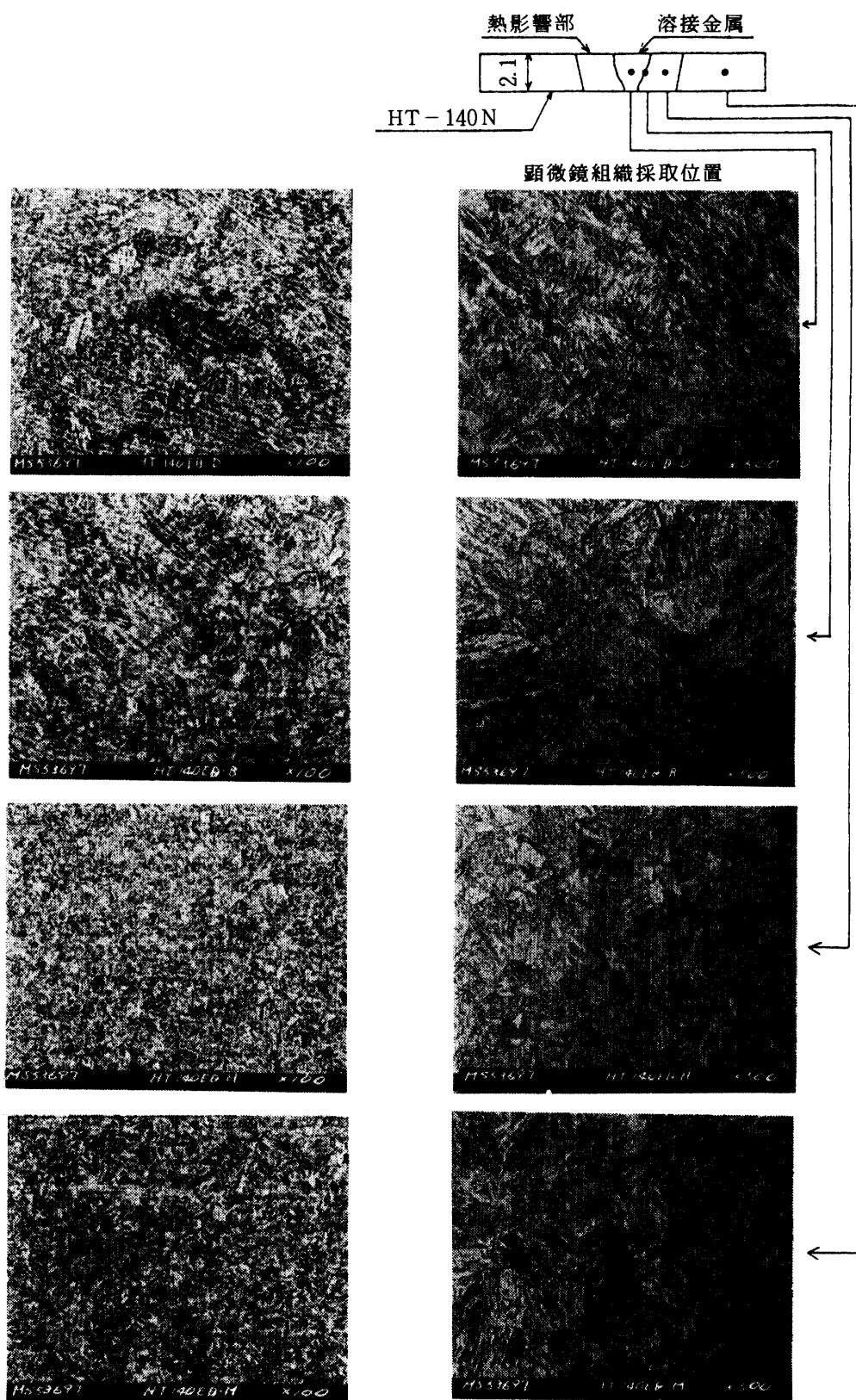


図3 HT 140 N EBW 継手の顕微鏡組織

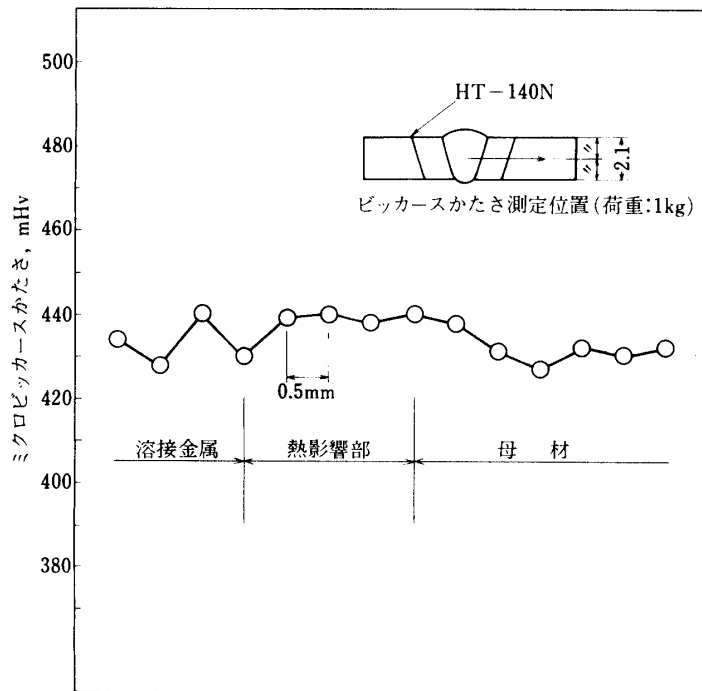


図4 HT 140 N鋼（板厚21mm）EBW 継手の断面かたさ分布

表2 設計仕様

設計仕様	設計圧力	7.35 MPa	
	設計最高温度	473 K	
	水圧試験圧力	7.35 MPa	
	材質	胴・前部鏡	HT 140 NP
		ボス・リング	HT 140 NF
	安全率(耐力に対する)	1.25	
	溶接継手効率	1.0	
	胴内径	519.8 mm	
	鏡内半径	420 mm	
	内容積	1.100 m ³	
材料仕様	材質	HT 140 NP, HT 140 NF	
	引張り強さ(常温~473K)	≥ 1226 MPa	
	0.2%耐力(常温~473K)	≥ 1177 MPa	
	伸び	≥ 8%	
	縦弾性係数	2.01 × 10 ⁵ MPa	

程度の硬さであり、高い継手効率が期待できる。

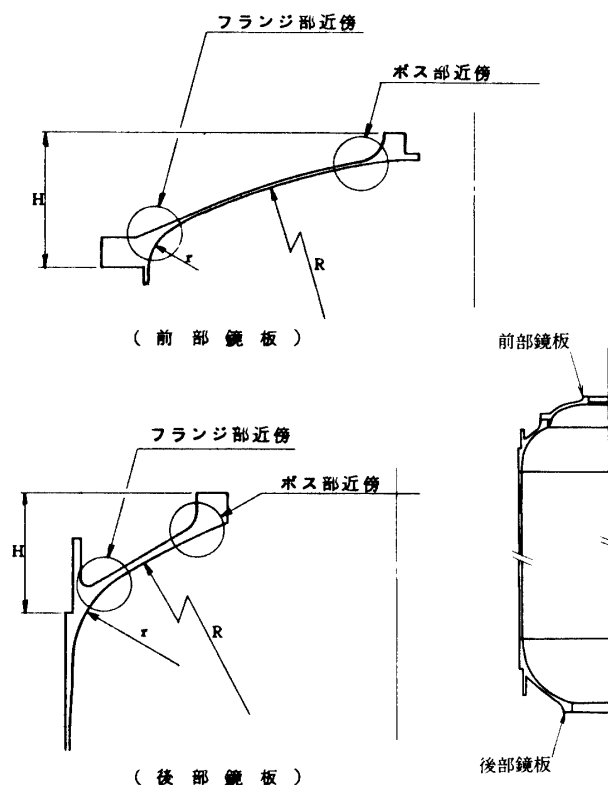


図5 鏡板形状

5. 構造設計

(1) 基本設計

(a) 安全率

安全率は使用材料の特性や加工法，検査法，さらには製品の取り扱われ方などをも考慮して決定すべきものであるが，従来，HT-140 鋼製モータケースは安全率 S_F を材料の耐力と発生応力との比で定義し， $S_F=1.3$ で設計されてきた．しかし，本モータケースでは過去6回の HT-140 鋼製のモデルチャンバ破壊試験結果，加工法の進歩，検査技術の向上等を考慮して $S_F=1.25$ で十分安全なモータケースが製作できるものと判断した．

(b) 設計仕様

S-520 では，モータ燃焼中の推力パターンを有利な形とする目的で，推薬の形状が複雑になっている．そのため，推薬直填時に使用中子をモータ前後部の双方から抜き出す必要が生じ，後部鏡板が直径 420 mm 以上の大きさで外せることという軽量設計上は不利な条件が課せられている．設計仕様を表 2 に示す．

(2) 不連続部の構造解析

(a) 解析手順

不連続部の構造解析では，全体の軽量化及び応力集中の緩和の 2 点に留意し，形状をパラメータにしたケーススタディを行い，形状を選定した．解析は形状関数として 2 次式を用い

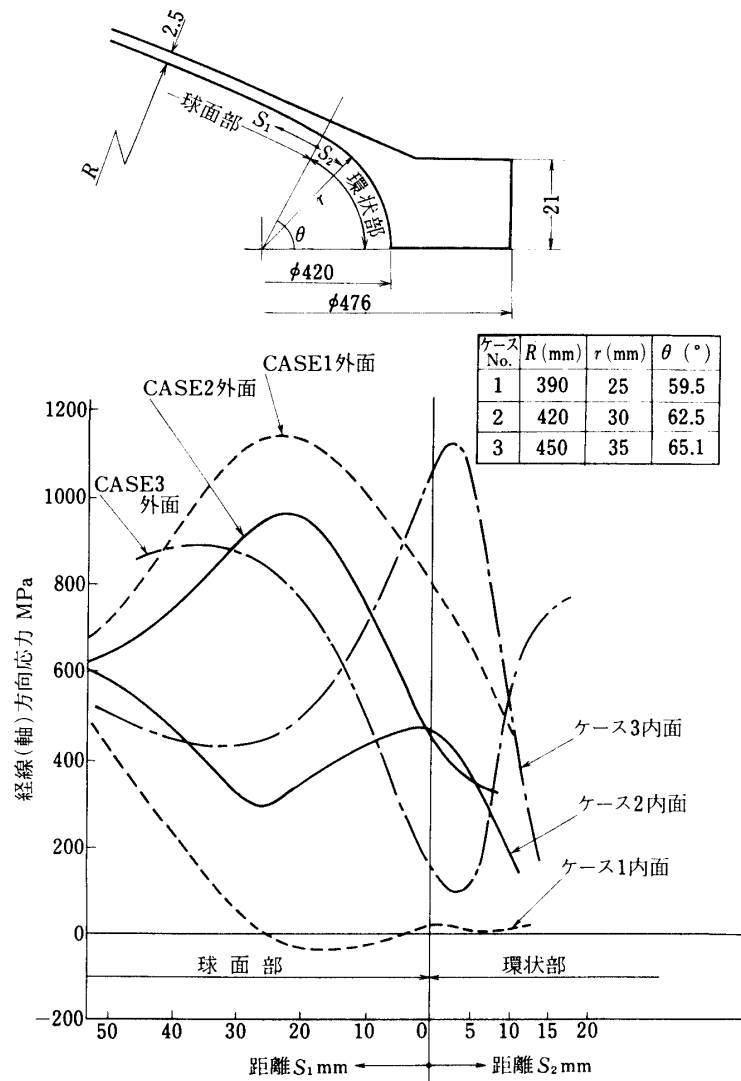


図6 鏡板形状の吟味 (内圧：7.35 MPa)

た6節点軸対称要素 FEM により行った。

鏡板の形状： 頭胴部又は尾翼筒との接続のために制約を受ける図5の寸法Hを固定し、同図の寸法R及びrを変化させた場合の応力分布の変化の計算例を図6に示す。球面部における応力集中は、R寸法が大きいほど緩やかになっているが、逆に環状部での応力集中が大きくなっている。形状としては、球面部、環状部の両方の応力集中をほぼバランスさせるのが有利と考えられる。パラメータを変えての比較計算の結果、 $R = 420 \text{ mm}$ 、 $r = 33 \text{ mm}$ を採用した。

鏡板フランジ部近傍： 鏡板のフランジ部近傍の応力集中を緩和できる形状を選ぶために行ったケーススタディの結果を図7に示す。これより、同図中のCASE-Aを採用した。

鏡板ボス近傍： 鏡板とボスの接続部にはボスの剛性の影響により曲げ応力が発生し、応

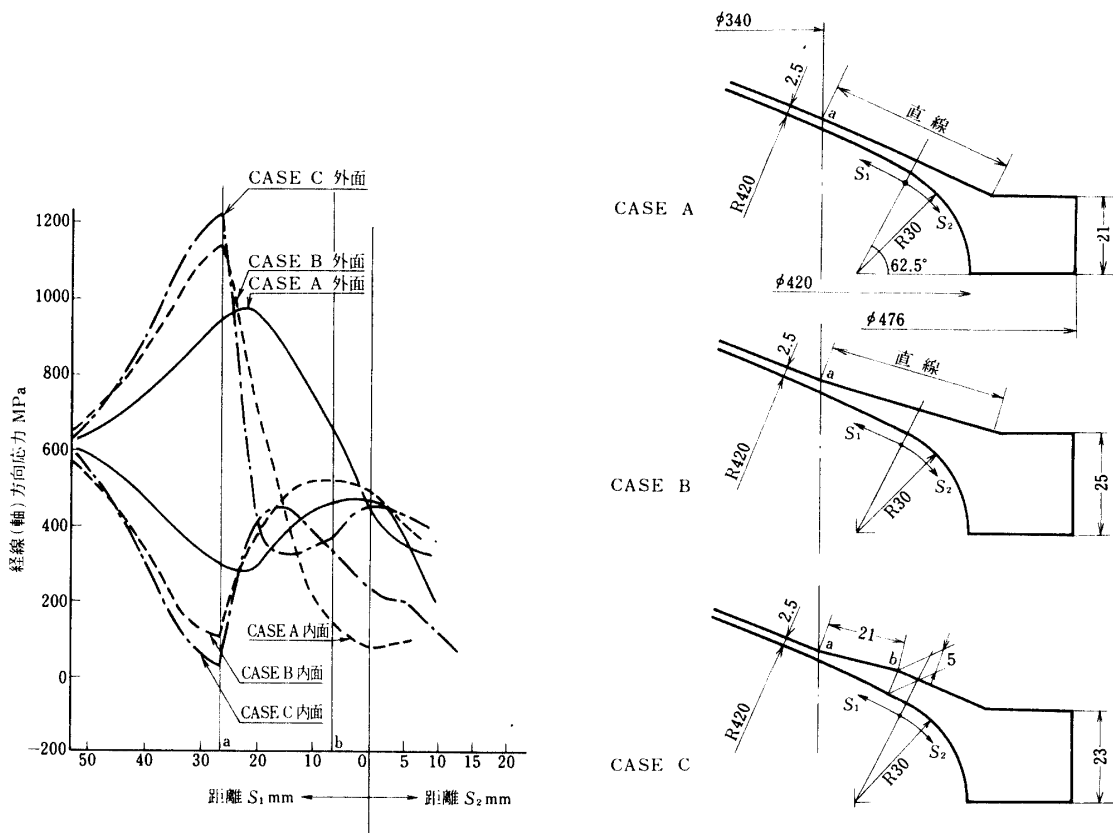


図7 フランジ部近傍形状の吟味 (内圧：7.35 MPa)

力集中値が高くなるおそれがある。この箇所についても、フランジ部近傍と同様にケーススタディを行い、形状を決定した。

(b) 計算結果と実測

前述のケーススタディ結果により決めた形状につき、解析を行ったが、図8に計算モデルの一例として、前部鏡板部の要素分割図を示す。

モーターケース内外表面の応力分布の計算結果を水圧試験時及び水圧破壊試験時の測定結果と合わせて図9～図11に示す。計算結果は、各不連続部の応力値ともすべて許容応力 ($\sigma_a = 941 \text{ MPa} = \frac{\sigma_y}{1.25}$) 以内におさまっている。また計算値と実測値の比較においても、胴部及び後部リング部については計測点位置の誤差を考えればよく一致しているといえよう。ただ、前部鏡板のボス部近傍においては、実測値が計算値を上回る点がある。この原因については、溶接による変形等により工作後の形状と設計形状に相違が生じ、応力分布が異なったことも考えられる。後述するように、この部分の実測形状に基づく補正計算を行い吟味した。

(3) 軽量化の方策とその効果

本モーターケースは、下記の項目により特段の努力をして軽量化を図った。

- i) 板厚公差引き下げによる上限板厚の引き下げ。
- ii) 安全率の低減による薄肉化

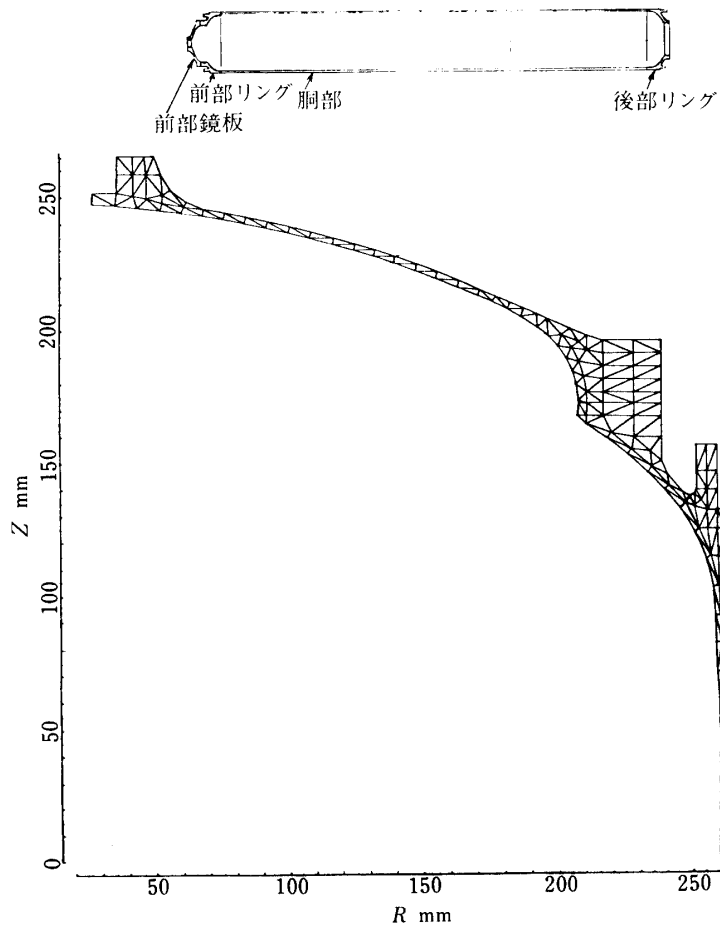


図8 前部鏡板部 FEM 要素分割図

- iii) 材料の強度向上による薄肉化
- iv) FEM 解析による不連続部の薄肉軽量化

これらの各項目により、従来のモータケースに比べて約15%の軽量化が達成出来たと考えている。各項目によりそれぞれどの程度の軽量化が行えたかを表3に示す。

6. モータケースの製作

地上燃焼試験用及び飛しょう用1号機の計2本のモータケースを製作し、その成果を吟味した。

(1) 工作精度の向上

長手溶接継手に電子ビーム溶接を適用することなどにより、真円・真直度の高精度化が達成出来た。

(a) 真円度

製作した地燃用及び飛しょう用1号機について真円度を実測した結果を、L型・K型と比較して図12にヒストグラムとして表わした。真円度はS-520型では2mm以下となってお

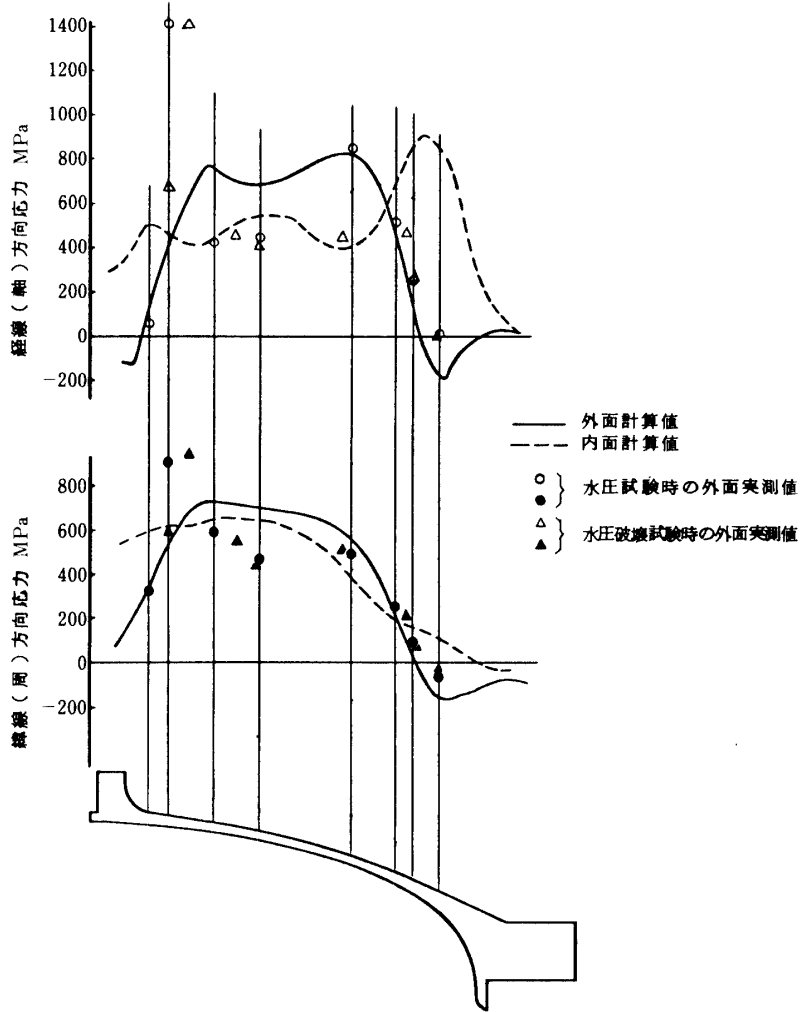


図9 前部鏡板応力計算結果と実測値 (内圧：7.35 MPa)

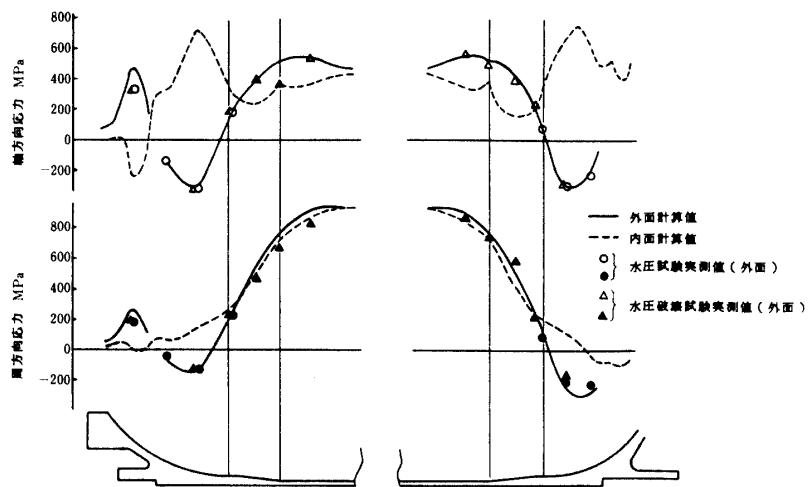


図10 胴部応力計算結果と実測値 (内圧：7.35 MPa)

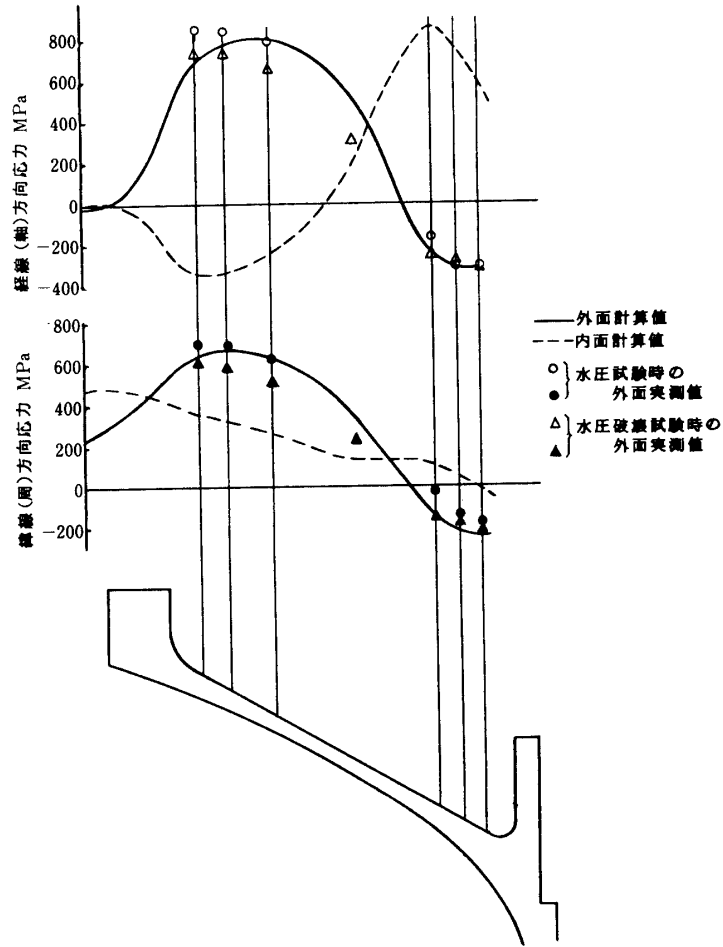


図11 後部リング応力計算結果と実測値 (内圧: 7.35 MPa)

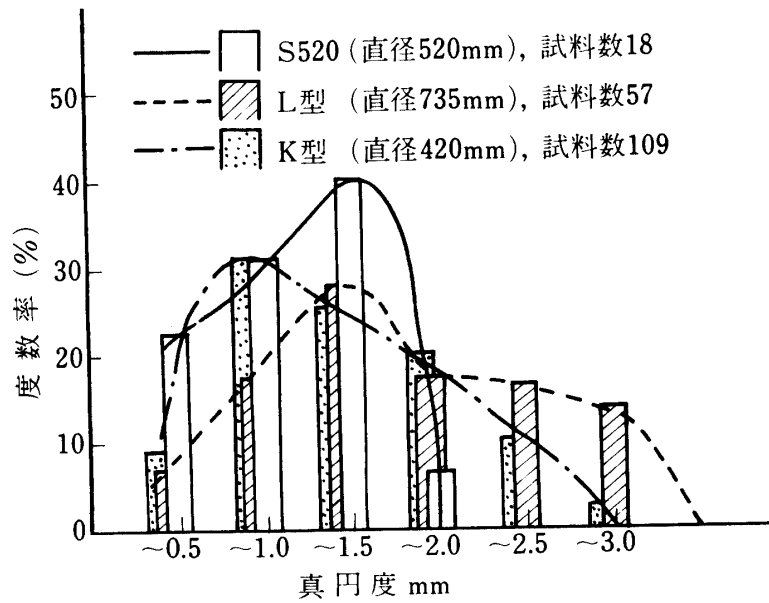


図12 真円度ヒストグラム

表 3 軽量化の内訳

軽量化アイテム	内 容	軽 量 化 重 量 ΔW kg	*5) 最大重量に対する 軽量化率 (%)
材料の強度アップ	胴板を 0.1mm 薄肉化	$\frac{0.1}{2.1} \times 143.9 = 6.85$ *2) *1)	3.39
材厚公差の減少	胴板厚公差幅を 0.2mm 縮小することによる最大重量の減少	$\frac{0.2}{2.1} \times 143.9 = 13.70$	6.78
安全率の低減	安全率 1.3 → 1.25 (4% 減少) による 4% 軽量化	*3) $201.62 \times 0.04 = 8.06$	4.00
不連続部の薄肉軽量化	F・E・M 応力解析により不連続部を約 5% 軽量化	*4) $43.62 \times 0.05 = 2.18$	1.08
合 計		30.8	15.3

*1) 基準板厚を 2.1mm とした

*2) 胴板重量

*3) モータケース最大重量

*4) 不連続部 (鍛鋼品) 重量

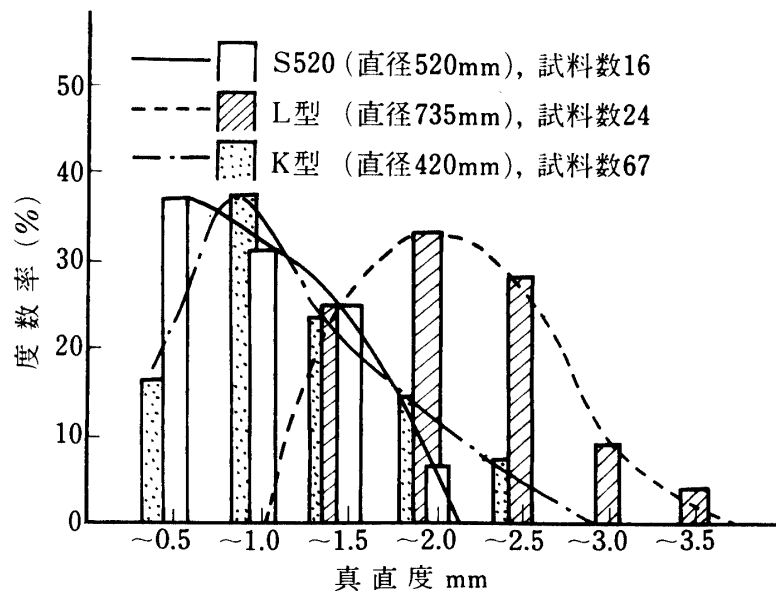
*5) 算式 $\frac{\Delta W}{201.62} \times 100$ 

図13 真直度ヒストグラム

り、従来のモータケースに比べて精度の向上が達成出来たことが分かる。

(b) 真直度

同様に、真直度を実測した結果を従来の実績と比較して図13に示す。真直度についても、

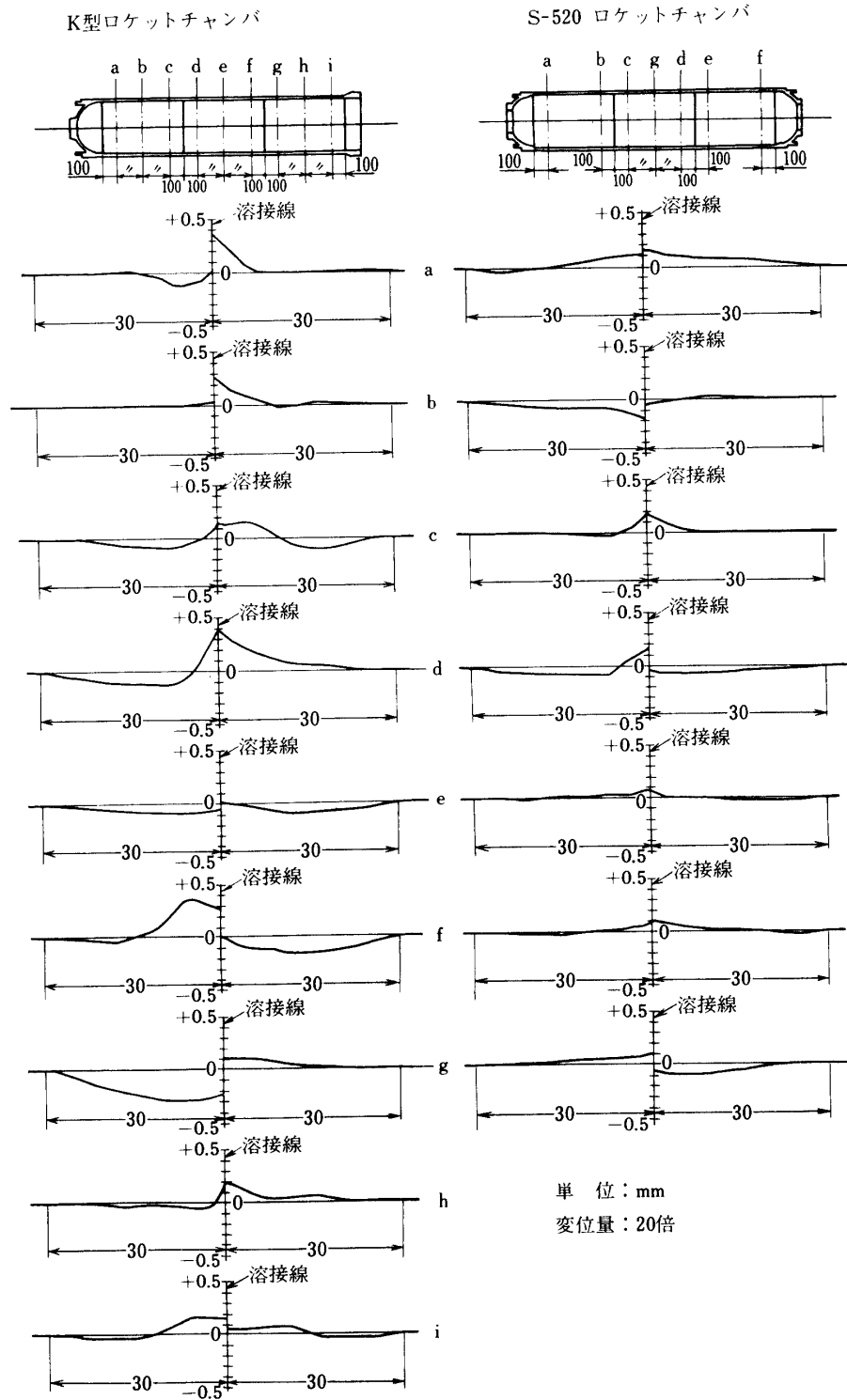


図14 K型及びS-520 モータケース長手溶接部局部変形

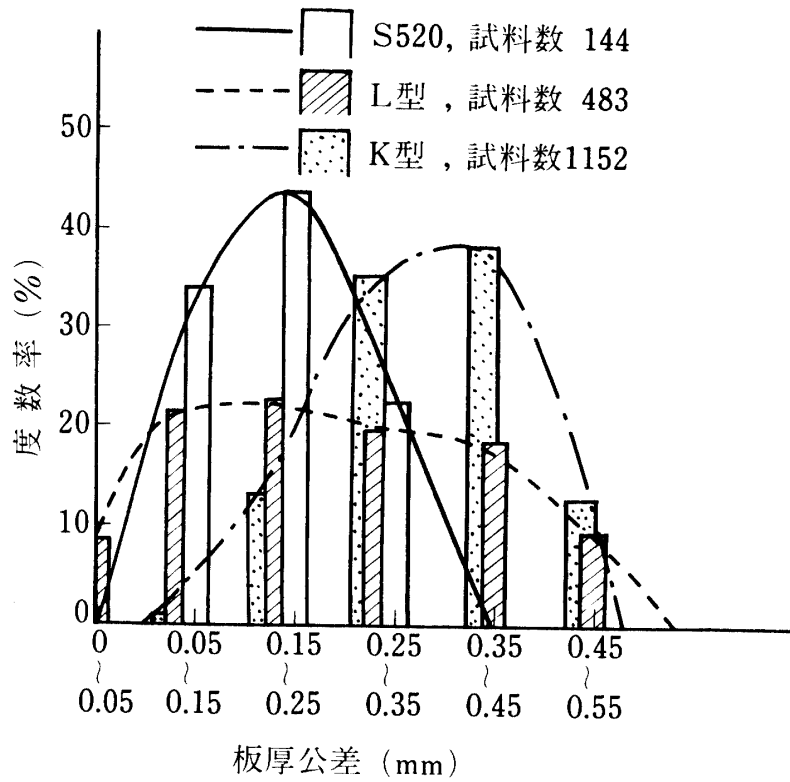


図15 板厚ヒストグラム

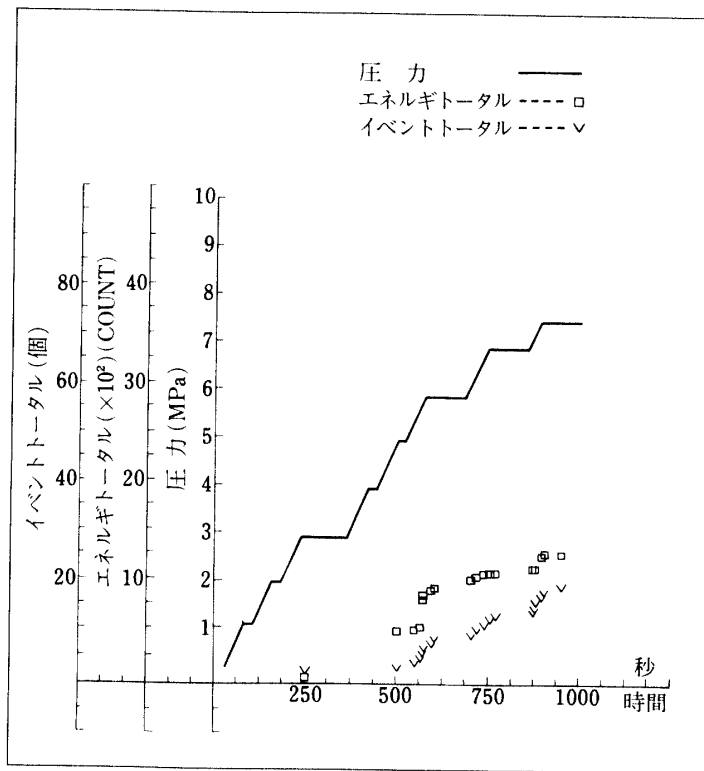


図16 AE計測結果(水圧試験)

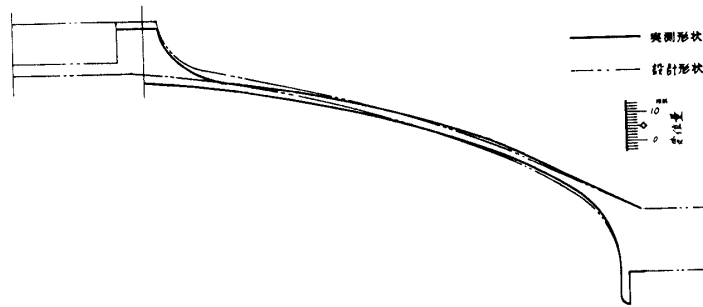


図17 前部鏡板の実測形状

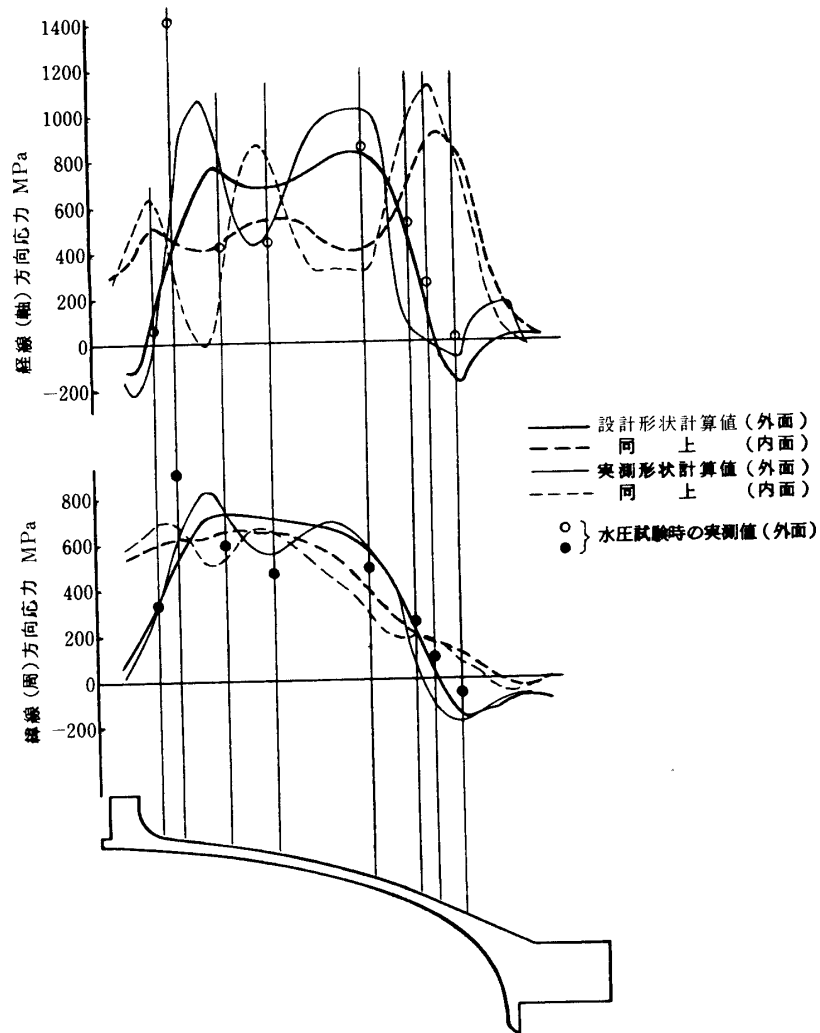


図18 前部鏡板実測形状に基づく計算結果 (圧内：7.35 MPa)

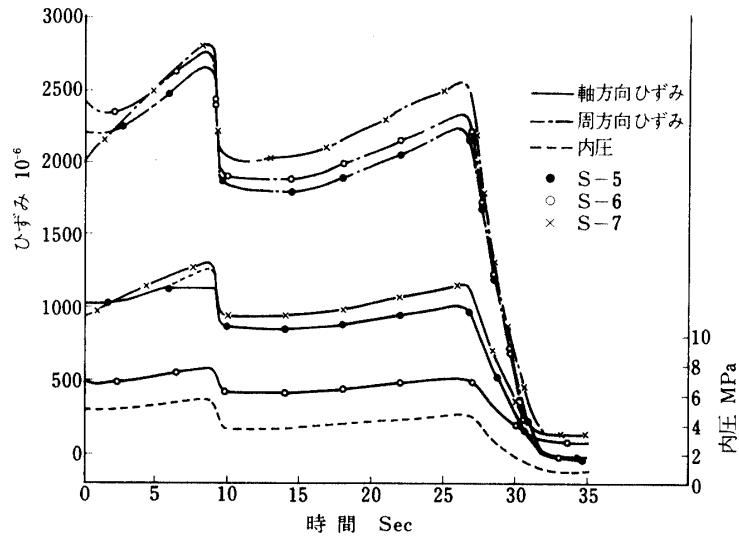
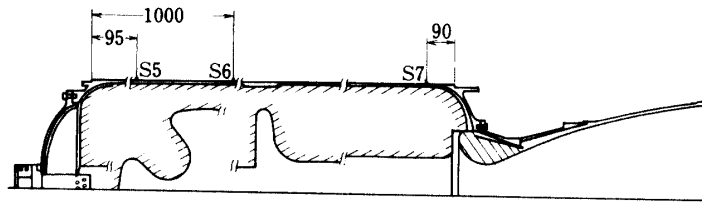


図19 地上燃焼試験におけるひずみの計測結果

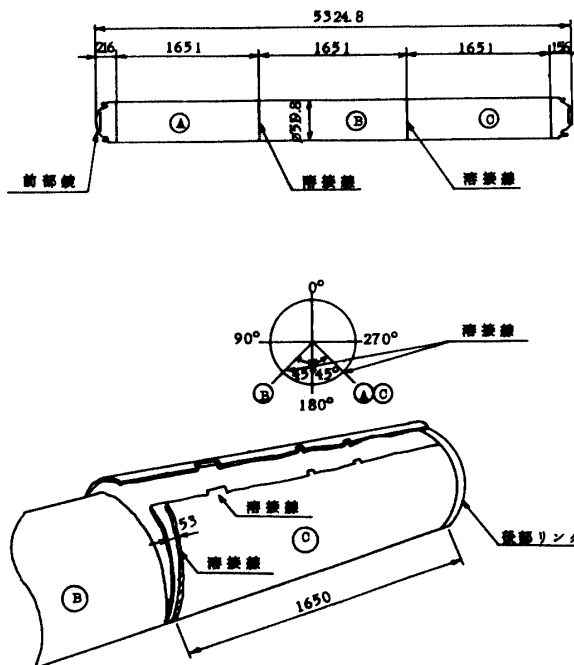


図20 破壊状況 (破壊内圧 13.26 MPa)

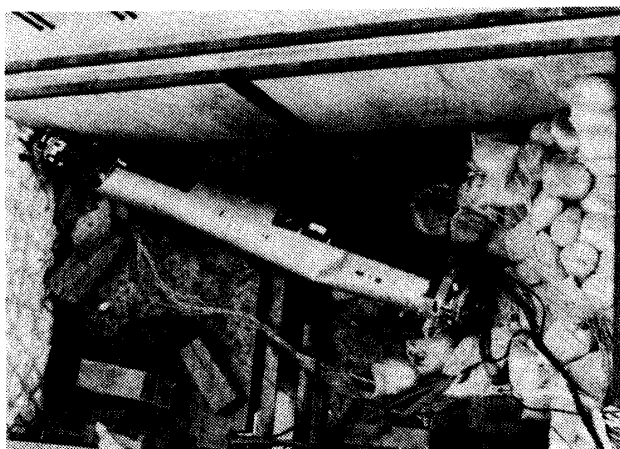


図21 破壊状況

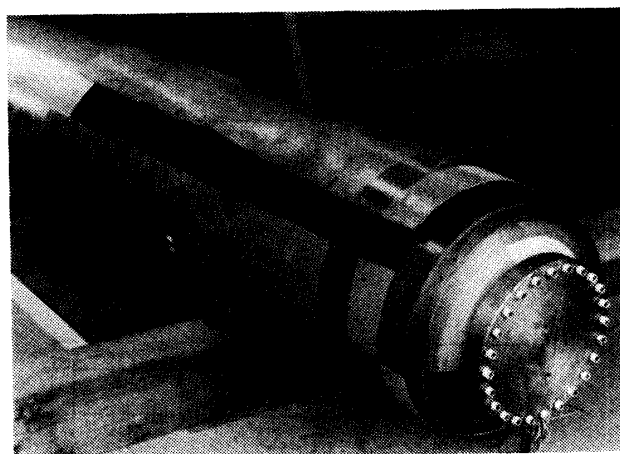


図22 破壊状況

従来に比べ格段の高精度が達成されている。

(c) 溶接部局部変形

長手溶接部の局部変形を実測した例を、従来のTIG溶接の場合と比較して図14に示す。局部変形量は、いずれの個所においても0.2mm程度であり、従来のTIG溶接と比べ、EBWの採用により局部変形量が小さくなっている。この精度向上は、前述の真円度向上に大きく寄与したものである。

(2) 板厚公差

従来のK型・L型ロケットモータケースの板厚には、 $+0.5_0$ mmの公差を許容していた。S-520では、モータケース用鋼板の製造実績から $+0.3_0$ mmの公差の見通しが立てられたので、これを適用して軽量化を図った。

図15にS-520の板厚分布を示すが、0.3mmの範囲内で分布し、L型・K型に比べて板厚公差の小さい方にピークが移行したことが分かる。

7. 水圧試験

地上燃焼試験のための推薬装填前に水圧試験を実施した。ひずみ計測を23点で、AE計測を胴板部4点で行った。内圧の昇降圧はステップ状に行い、ひずみ計測は各ステップの圧力保持中に、AE計測は連続監視で行った。

図9～図11に内圧7.35 MPa時における、ひずみ実測値から弾性を仮定して形式的に求めた応力分布と計算応力とを比較して示す。一般部については両者は約10%以下の精度で一致しているが、前部鏡板のボス部近傍については実測値は計算値よりかなり大きな応力集中が見られる。この原因の一つとして、前述の通り、溶接による変形等により工作後の形状と設計形状に違いが生じたことが考えられるので、後述するようにこの部分の実測形状に基づく補正計算を行った。

AE計測は、円筒部に4個のセンサを取り付け、NF製4チャンネル計測装置を用いて水圧試験中連続的に行った。図16にイベントトータル及びエネルギートータルを示す。位置標定結果、当然のことであるが溶接線近傍でのAEの発生が比較的多いが、圧力上昇に対するAEの発生は滑らかであり、特に異常は認められなかった。

8. 実測形状に基づく応力解析

前部鏡板ボス部近傍の計算応力と実測応力の違いを確かめるため、前部鏡板の実測形状を3次元測定装置により計測し、実測形状に基づく応力計算をFEMにより行った。図17に実測形状を設計形状と比較して示すが、ボス溶接部で2～3mmの落ち込みがあり、鏡板全体としては設計形状より浅い皿型となっている。

計算結果を図18に実測値とともに示す。ボス部近傍では形状差を入れた計算値は実測値にかなり近づくが、まだ差がある。

9. 地上燃焼試験

水圧試験の終わったモータケースは、推薬の装填、ノズル組付等を行い、54年7月能代実験場において地上燃焼試験を行った。この試験において、モータケース外面20点のひずみ計測を行った。図19に燃焼中のひずみ変化の一例を示すが、ひずみは内圧曲線によく相似している。

10. 水圧破壊試験

地上燃焼試験を終えたモータケースを活用して、水圧破壊試験を行った。

(1) 試験要領

加圧は1回目は0.98 MPaごとのステップ昇圧にて4.90 MPaまで、2回目は同様のステップ昇圧にて7.35 MPaまで加圧し、3回目に破壊までステップ昇圧を行った。

計測項目は次の3項目である。

- i) ひずみ計測；モータケース外面32点
- ii) 鏡板取付部相対変位（ズレ）計測；8点
- iii) AE計測；4ch

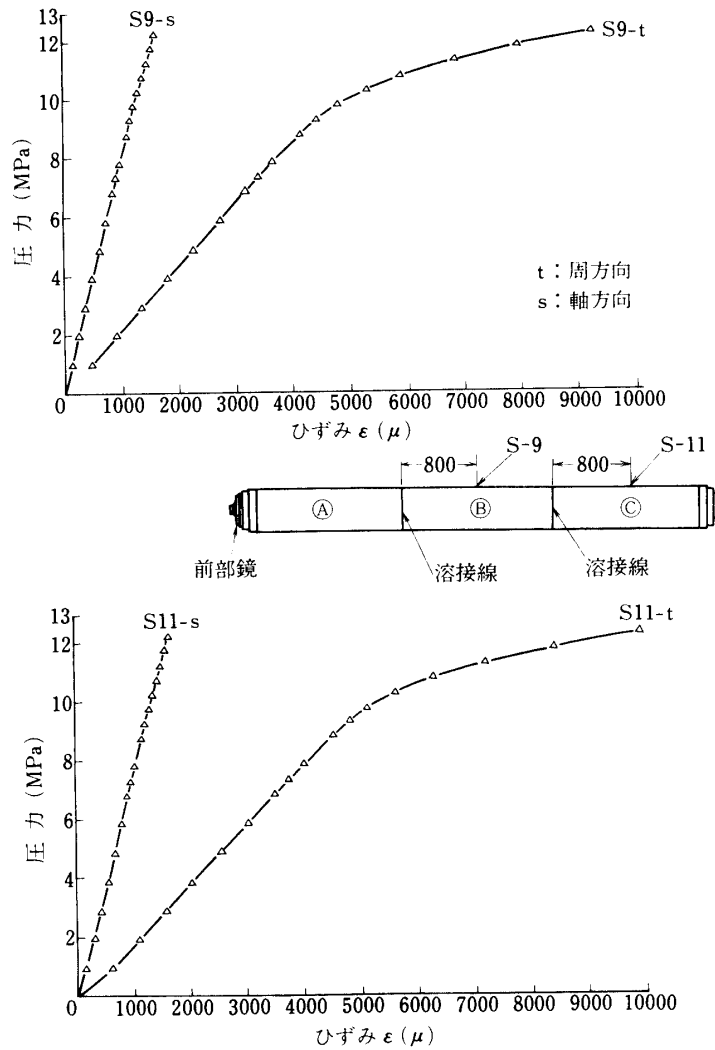


図23 胴部外面の圧力-ひずみ線図

(2) 試験結果

破壊圧力：破壊は胴部で生じ、破壊圧力は 12.7 MPa であった。胴の平均直径 (d_m)、板厚 (t) より単純に求めた周方向応力 (σ) は破壊内圧 (P) に対して

$$\sigma = \frac{d_m}{2t} \cdot P = 1416 \text{ MPa}$$

となり、材料の引張り強さ $\sigma_B = 1389 \text{ MPa}$ とほぼ一致している。

破壊状況：破壊箇所は胴部C部長手方向溶接部全面と、周方向溶接継手より53mm離れた一般部周方向に生じた。この状況を図20～図22に示すが、破壊後の周長、板厚計測結果から判断すると、亀裂は最も伸びの大きいC部胴中央付近の長手溶接線上を両側に走り、さらに周方向に到ったものと想定される。

(3) ひずみ計測

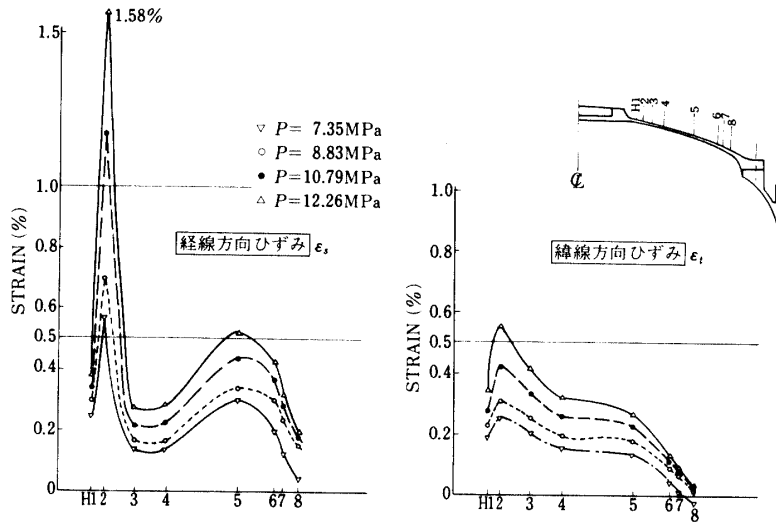
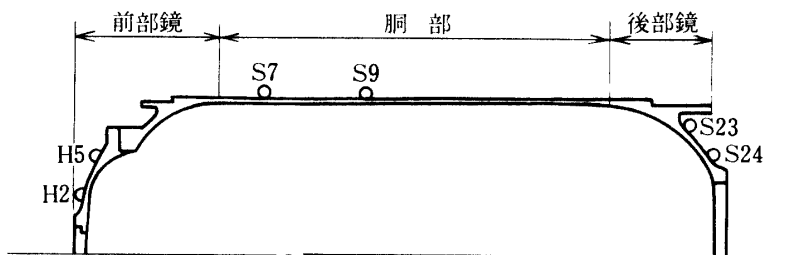


図24 前部鏡板ひずみ分布

表 4 破壊直前のひずみ実測値

位 置	緯線(周)方向	経線(軸)方向	* 印は P = 12.3 MPa における実測値
前部鏡 H 2	6000×10^{-6}	* 15800×10^{-6}	
H 5	2800	* 5300	
後部鏡 S 23	3600	* 5000	
S 24	4200	6200	
胴部 S 9	* 10500	1600	
S 7	12000	1600	



計測位置： ひずみ計測は、モーターケース外面32点について行った。応力集中が予想される前部鏡板、後部リング等の一部については塑性ゲージをも合わせて用い、破壊まで連続的に動的計測を行った。

破壊時のひずみ： 図23に破壊に至るまでのモーターケース胴板部外面の圧力～ひずみ線図の一例を示す。また、図24には前部鏡板のひずみ分布を示す。表4に示すように、破壊した胴一般部の周方向ひずみは内圧 P = 12.7 MPa のとき約 1.2 % であり、最大ひずみは前部鏡のボス付け根の経線方向に生じ、破壊直前の P = 12.3 MPa で 1.58 % である。

弾性応力分布： モーターケース各部の外表面ひずみ測定結果を見ると、設計圧力 P = 7.35

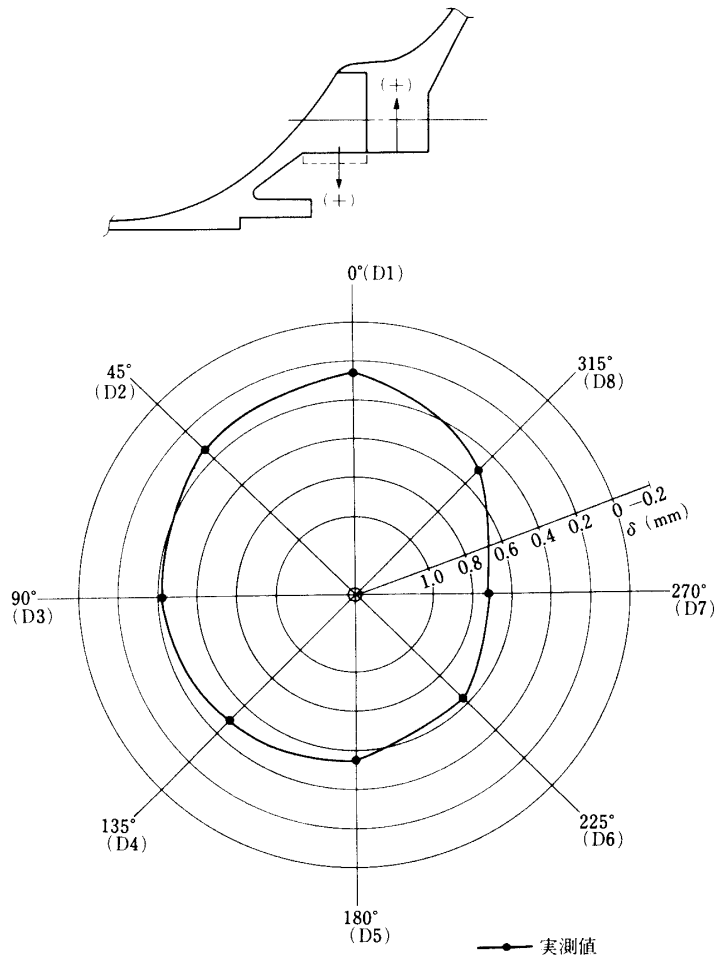


図25 前部鏡フランジ部のズレ分布 (内圧：7.35 MPa)

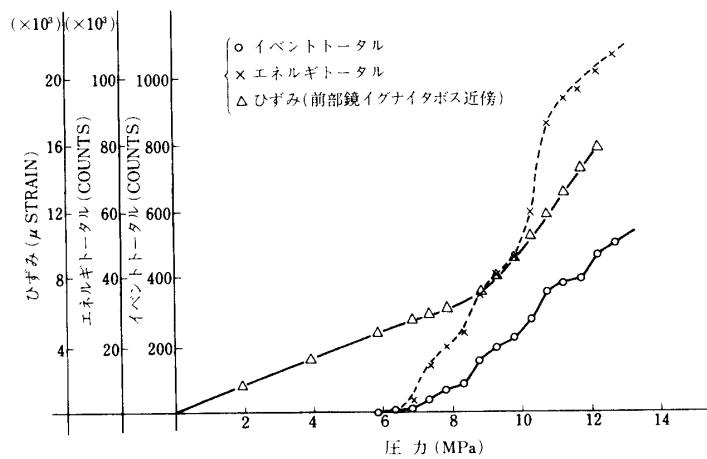


図26 AE計測結果 (水圧破壊試験)

MPa まではほぼ弾性挙動を示している。今回の破壊試験時（地上燃焼後）と前回の製作直後の水圧試験時のモータケース外表面のひずみ測定結果から弾性を仮定して求めた応力分布を FEM 計算値とともに 図9～図11に示したが、地上燃焼試験前とほぼ等しい応力値となっている。

（４）変位計測

前述のように、本モータケースの前部鏡板はモータケース本体にボルトで結合されている。従って、内圧が作用した場合に、モータケース本体と前部鏡板が合わせ面で相対的に変位することが考えられるので、この計測を実施した。計測はカンチレバー式変位計をモータケース本体に固定し、プローブを前部鏡板フランジ部に当てて半径方向の相対変位を測定するようにした。7.35 MPa での計測結果を図25に示すが、周方向相対変位はほぼ一様で最大 0.7 mm である。

（５）AE計測

製作直後の水圧試験で AE 計測を行ったが、破壊時の挙動を確認するため再度計測した。計測箇所はこれまでの応力計測結果から、応力値の大きい鏡板部の 4 点にセンサを配した。

図26に圧力とエネルギー総量、イベント総量、及びひずみとの関係を示す。圧力 9 MPa 付近から塑性変形領域に入りつつあり、AE は塑性変形に入った直後まで盛んに発生するが、それ以後は静かになったと考えられる。なお破断位置が AE 監視領域でなかったため、破断直前に AE の急増は見られなかった。

11. ま と め

S-520 ロケットモータケースは、これまでの設計と製造の実績を生かした上に、新しい製作・加工・検査技術と応力解析手段を駆使した研究開発により一段と性能の高いモータケースとして計画された。このモータケースは製作系列から分類すると従来の L 型・K 型の延長となるものであるが、その設計思想、製作技術においては、下記の点において際立った進展を図ったものであるといえよう。

（１）材料・加工法・検査法の向上を基盤として工作精度の向上を図り、板厚精度において従来のモータケースより高精度化が達成出来た。

（２）従来の製作実績よりの安全率の吟味と、FEM 応力解析による応力集中緩和設計により軽量化を実施した。

最後に、本モータケースの開発に当り、御指導、御助言を頂いた、宇宙科学研究所 堀内良教授、秋葉鏝二郎教授、松尾弘毅助教授、東大工学部 境界領域研究施設 砂川恵教授に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- [1] 鈴木, 下山, 正野, 亀井; MB 130 製圧力容器の破壊試験, 三菱重工技報 Vol.5 No 3
- [2] 森, 今政, 山下; ラムダロケット用MB130 鋼モータケースの強度研究, 三菱重工技報 Vol.7 No. 5
- [3] 森, 小野田, 今政, 下山, 斎藤, 岡崎; S - 520 小形ロケット用モータケースの開発, 三菱重工技報 Vol.17 No. 5