

ISSN 0389-4010
UDC 620.179
621.454
621.386.1
629.76

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1297

上段固体ロケット・モータの信頼性評価基準に
関する研究
(その2. 固体推進薬の変形・損傷・破壊と燃焼)

上段固体モータ信頼性研究グループ

1996年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第1章	固体推進薬の破壊過程	……………	(清水)	…	4
第2章	破壊過程の微視観測による破壊基準	……………	(伊藤)	…	9
第3章	チムニー型ストランド燃焼速度測定装置とTV観測法	……………	(藤原)	…	22
第4章	推進薬の変形時の燃焼速度	……………	(種村)	…	29
第5章	推進薬用疲労試験機の開発と統計的疲労強度	……………	(種村)	…	32
第6章	推進薬疲労特性の温度・時間依存性	……………	(藤原)	…	38
第7章	高周波疲労試験機の開発	……………	(藤原)	…	41
第8章	国産上段モータ用推進薬の疲労と燃焼	……………	(種村)	…	45
第9章	推進薬クラック内火炎伝播	……………	(伊藤)	…	49
第10章	結論	……………	(清水, 兵頭)	…	53

上段固体ロケット・モータの信頼性評価基準に関する研究*

(その2. 固体推進薬の変形・損傷・破壊と燃焼)

上段固体モータ信頼性研究グループ*¹

Research on Reliability Criteria of Upper Stage Solid Rocket Motors (II: Deformation, Damage, Fracture and Combustion)

Upper Stage Solid Motor Reliability Research Group

ABSTRACT

In order to establish high reliability of the first domestically developed apogee and third motors of the H-I rocket, NAL and NASDA performed co-research of "Experimental Research on Reliability Criteria of the Upper Stage Solid Rocket Motors," by organizing "Upper Stage Solid Motor Reliability Research Group" for 1980 to 1984. The research consisted of "Investigation on Tolerance Criteria of Solid Propellant Defects" and "Nondestructive Inspection Method of Propellant Defects," and much data was collected in these studies. This research activity was supported by NAL special research activities. This second report presents macro- and micro-failure processes of solid propellants and propellant deformation, damage and fracture themselves and their relation to combustion by testing with a developed combustion rate measuring device, a special fatigue testing machine for solid propellant and so on.

Keywords : solid motor, upper stage, propellant damage, propellant fatigue, propellant combustion

概 要

国産・自主技術で進めたH-Iロケット用第3段モータ及びアポジ・モータの開発において重要な要素である信頼性の確立を計るため、航空宇宙技術研究所(NAL)と宇宙開発事業団(NASDA)が研究グループ「上段固体モータ信頼性研究グループ」を結成し、共同研究「上段固体ロケットモータの信頼性評価基準に関する実験的研究」を昭和55年度から昭和59年度まで行った。そしてその主体である推進薬の欠陥許容判定基準の研究及び推進薬の欠陥検出法の研究についての成果をその後の研究成果も含めて3部作の報告書にまとめた。なお、本共同研究はNAL特別研究「上段モータの信頼性評価基準に関する研究」と緊密な関係のもとで行われた。本報告では、推進薬の破壊過程を巨視的、微視的に明らかにすると共に、燃焼速度測定装置、推進薬用疲労試験機の開発とそれによる試験等により、推進薬の変形、損傷、破壊それ自体と、その燃焼との関連の研究について述べる。

* 平成8年3月18日 受付 (received March 1996)

*¹ 宇宙研究グループ (Space Technology Research Group)
宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

経緯・要約

アポジ・モータ等の上段モータは、静止衛星の軌道投入を確実にするための最重要システムであり、信頼性が高く高性能なロケット・モータが要求される。550kg級静止衛星打上げ用H-Iロケットの開発においては、その第3段モータ、アポジ・モータの国産自主開発が行われた。このような上段モータの自主開発は我国初めてのことであり、米国水準の上段モータ開発には数多くの技術的難関が存在する。高い信頼性の確保についても種々の課題があるが、ここでは、航空宇宙技術研究所での固体ロケットの研究実績を考慮して、「推進薬の欠陥許容判定基準の研究」(固体推進薬の強度・破壊・損傷とその燃焼特性への影響についての研究)と「推進薬の欠陥検出法の研究」(固体モータの推進薬周辺の欠陥に対する非破壊検査法)とを対象として、航空宇宙技術研究所-宇宙開発事業団共同の研究グループ「上段固体モータ信頼性研究グループ」(表1)を結成し、共同研究「上段固体ロケットモータの信頼性評価基準に関する実験的研究」を計画・実行した。本共同研究は航技研特別研究「上段モータの信頼性評価基準に関する研究」と緊密な関係のもとで進められた。さらにその後の研究成果も含

めて、その研究成果をまとめて3部作報告とした。

固体ロケットの代表的な欠陥を図1に、研究内容を表2に示すが、「あやめ」、「あやめ2号」の連続不具合の教訓を強く意識し、その原因とみられる推進薬欠陥の燃焼への影響の研究と、画期的な推進薬欠陥検出法の研究が、その主眼である。実験に使用した推進薬の大部分はH-Iロケットの上段モータ用推進薬であり、そのデータは直接、国産開発中のこれらのモータの信頼性向上に役立て得る。得られた成果は、「宇宙技術及び科学の国際シンポジウム(ISTS)」や、宇宙科学研究所(ISAS)の主宰する「宇宙輸送シンポジウム」などでの共同発表や、それに先立って直接的な方法により、上段モータの開発側にフィード・バックされ、図2に示すような上段モータの信頼性評価過程において重要な役割を果たし、信頼性向上に大きく寄与した。

本報告は上記3部作のうちの第2報(その2、固体推進薬の変形・損傷・破壊と燃焼)である。固体推進薬は製造から燃焼までの間に、自重、振動、熱応力等により変形し、強度的には損傷を受け、さらには破壊にいたる。そして、これらの変形・損傷・破壊により燃焼はどのような影響を受けるかが、固体モータの信頼性確保のために問題となる。

表1 「上段固体モータ信頼性研究グループ」のメンバー

	航空宇宙技術研究所	宇宙開発事業団
主担当	五代 富文 (FY55)	吉山 巖 (FY55~FY57)
"	清水 盛生 (FY56~FY59)	斎藤 紀男 (FY58~FY59)
担当	" (FY55)	" (FY55, FY57)
"	伊藤 克弥 (FY55~FY59)	五代 富文 (FY56~FY59)
"	種村 利春 (")	祖父江照雄 (FY55, FY59)
"	藤原 勉 (")	佐野 昇 (FY55~FY57)
		高橋 道夫 (FY55~FY59)
		江口 昭裕 (FY56~FY59)
		兵藤 幸夫 (FY58, FY59)

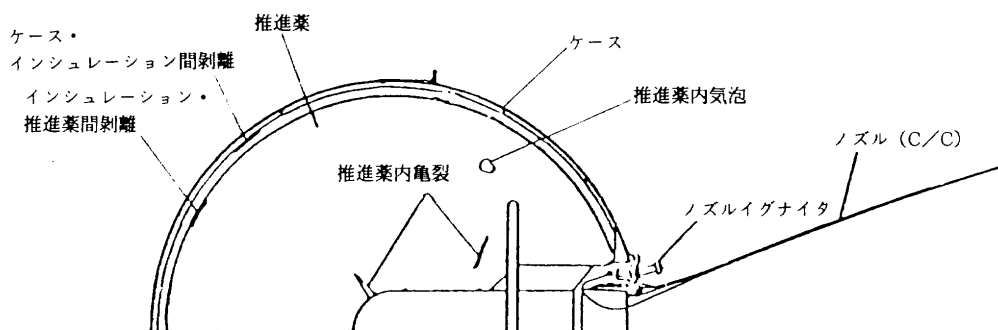


図1 固体モーター（上段を含む）の代表的な欠陥

表2 推進薬の欠陥・損傷許容判定基準に関する研究内容と非破壊検査法

<p>(1) 推進薬の欠陥・損傷許容判定基準に関する研究</p> <p>①固体モータの人工欠陥作成法 推進薬内気泡、ケース・インシユレーション間剝離、インシユレーション・推進薬間剝離等の人工欠陥作成法を実験的に確立し、H-I アポジ・モータの1/4縮尺球型モータ等に各種人工欠陥を付すことに成功した。</p> <p>②人工欠陥付き小型球型モータの燃焼試験 人工欠陥付き各種モータをパルスX線写真法、X線TV法による観測下で燃焼試験を行い、欠陥付近での燃焼状況を観測した。</p> <p>③推進薬クラック内の火炎伝播 欠陥の中で最も危険な推進薬クラックについて、試験片レベルにてモータ燃焼内圧と同等の圧力条件下で、火炎のクラック内への伝播挙動を工学的に精密に測定した。</p> <p>④推進薬用疲労試験機の開発と試験 市販疲労試験機より100倍も荷重感度、制御性がよく、実機と同等の荷重周波数での試験ができる推進薬専用の疲労試験機を開発し、H-I アポジ・モータ、第3段モータ用推進薬について疲労強度データを得た。</p> <p>⑤損傷と燃焼の関係 クリープや疲労による損傷の推進薬の燃焼速度への影響について実験した。</p>	<p>(2) 非破壊検査法の研究</p> <p>①X線写真法 最も一般的に行われており、推進薬気泡のように体積のある欠陥検査に極めて有効である。ただし、せまいクラックや剝離は検出できない場合が多い。</p> <p>②超音波探傷法 金属製モータケース・インシユレーション間剝離の検出に極めて有効であり、手軽・安全・安価な方法である。</p> <p>③X線TV法 X線で写真を撮る代わりにX線像をTVに撮影する方法で、供試体を回転させながら、リアルタイム観測することによりクラックを含む広範囲の欠陥検査が短時間に可能となる。</p> <p>④X線CT法 医用で近年めざましく発展したコンピュータ・トモグラフィ法で極めて高感度・鮮明な断層像が得られ、工業分野への応用が最近ではまっている。</p> <p>⑤赤外線法 欠陥部の熱伝達の異常を外表面の温度分布から検出する方法で、研究段階にある。</p> <p>⑥ホログラフィ法 欠陥部の変形の外表面の変位分布から検出する方法で、研究段階にある。</p>
---	--

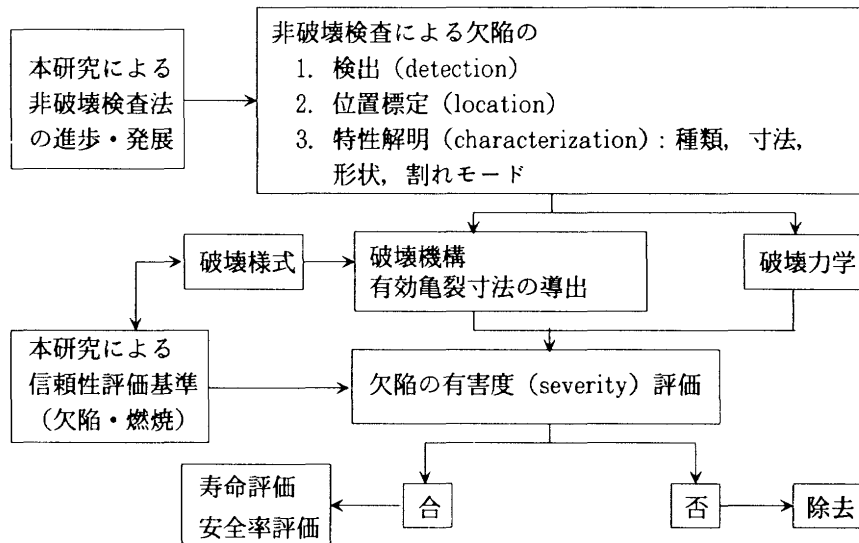


図2 本研究による非破壊検査法と信頼性評価基準の上段モータ開発・運用での役割

ここでは推進薬の破壊過程を巨視的、微視的に明らかにすると共に、燃焼速度測定装置、推進薬疲労試験機の開発とそれによる試験等により、推進薬の変形、損傷、破壊それ自体と、その燃焼との関連の研究について述べる。

本報告書の執筆分担は目次に示す。尚、全体の調整は清水が行った。

第1章 固体推進薬の破壊過程

1.1 まえがき

固体ロケット・モータの開発にあたっては、強度的には、モータの構造強度的研究と共に、モータ部材の破壊基準の確立が必要である。ここでは高分子粘結材の中に高い充填率で酸化剤粒子等を含む複合固体推進薬をとりあげる。複合固体推進薬のような粒子充填ゴム系複合材料の破壊基準の確立にあたっては、その破壊過程を研究する必要があるという観点に立って、一回繰返し伸張試験法により、破壊過程の進行と共に生ずる力学的物性の変化と残留強度^{1.1)}、破壊過程にて消費される破壊エネルギーとその温度・時間依存性^{1.2)}について研究を行って来た。ここでは、これまで取り扱って来た一般的なCTPB系推進薬とは異なり、推力大きさ制御型固体ロケット・モータ用のCTPB系推進薬^{1.3)}を採り上げ、多重繰返し伸張試験による強度、破壊エネルギーについて報告する。これは第5～8章に後述する推進薬の疲労強度の研究につながるものであり、言わば“推進薬の極低サイクル疲労”に相当しよう。

1.2 破壊過程モデル

複合固体推進薬は材料強度的には「粒子充填ゴム系複合材料」とでも呼ぶべきもので、粘弾性、大変形、複合効果等、解決困難な問題を多く含む材料である。その単軸伸張における破壊過程は大略次のように区分できる^{1.4)}。

(1) 弾性過程 (図1.1, 図1.2のO-I)

充填剤粒子と粘結剤との剝離や、粘結剤の切断等の内部破壊が無視しうる。

(2) 剝離過程 (図1.1, 図1.2のI-A)

図1.1において、Iより大きな伸びを与えると、“Mullins 効果”^{1.5)}により、試験内部に軟化した領域が現われ、伸びが大きくなると軟化領域が増大する。軟化は充填剤と粘結剤との剝離により生ずる。今、試験片を伸張はじめると、図1.1のIから剝離過程に入る。Aまで伸張させると、充填剤粒子はaまで剝離したとする。ここで除荷して、再び伸張すると、O-I-A'のコースをたどる。A'をすぎると新たな剝離を伴いながらBまで進行して処女曲線と合致する。Bでは充填

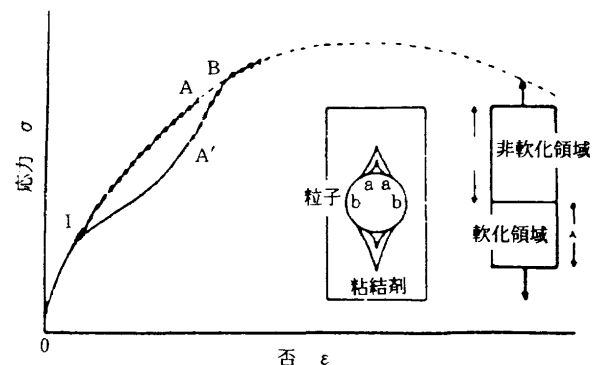


図1.1 “Mullins 効果”を表わす剝離過程モデル

剤粒子はbまで剥離しており、これ以後はAまでの伸張履歴は影響しないとする。

(3) 粘結剤部材の切断過程 (図1.2のA-b)

剥離過程と切断過程とが分離できるとする。従って図1.2内に示すような粘結剤の立体的網目構造を想定すれば良い。剥離した充填剤粒子は網目にひっかかっているだけで、力学的には効果を及ぼさないとする。網目を構成する個々の粘結剤部材は図1.2内に示すような、ゴム材料に良く見られる逆S字状 ($\epsilon = 2$ で変曲点) の応力・歪曲線をもつ。また、粘結剤部材はその長さにかんがりのバラツキがある。

図1.2の0から ϵ_A まで伸張して剥離過程を終らせた後、除荷し、再び伸張するとO-I-E-Aのコースをたどる。ここまでは比較的短かい粘結剤部材の逆S字特性が強く表われて、歪の比較的小さいE点に変曲点となっている。A点以後は短かい粘結剤部材から順次切断しつづけるため、応力の増加が鈍り、最大値を経過し応力が低下するにいたる。

また、あらかじめ ϵ_D まで伸張してある場合には、極く長い粘結剤部材以外はほとんど切断してしまっているので、Iに相当する歪での応力も下り、逆S字曲線の歪曲点Hも歪の大きいところにある。さらに、次の歪曲点Dまで達すると、粘結剤部材の切断が再開され、b点にいたって破断する。つまり、A-B-C-Dは粘結剤部材切断のスタート・ラインである。同様に、E-F-G-Hは粘結剤部材の応力・歪曲線の逆S字状の歪曲点を結合したもので、これは、粘結剤部材の歪集中率の測定的基础となる。

(4) 全体的破断 (図1.2のb)

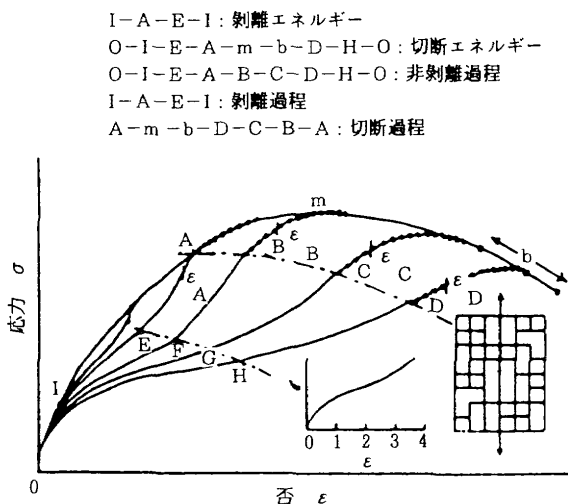


図1.2 固体推進薬破壊過程モデル

破断過程で発生・成長した数多くのクラックの中の最も大きなものの一つから、急激なクラック進展を生じて破断する。破断点bにはかなりのバラツキがあるが、これは破断に直結しうるような大きなクラックの形成と、クラック相互の干渉とにバラツキがあるためであろう。

以上のような破壊過程を想定すると、図1.2において閉ループI-A-E-I内は剥離過程であり、その面積は剥離エネルギーに相当する。同様に、O-I-E-A-m-b-D-H-Oの面積は粘結剤部材切断エネルギーに相当する。

1.3 試験方法

供された試料は、航空宇宙技術研究所宇宙研究グループにて開発された推力大きさ制御型固体ロケット・モータ用の高圧力指数型複合推進薬^{1,3)}(RS-1105)で、M APO等により架橋されたCTPB (Carboxyl-Terminated Polybutadiene) を粘結剤とし、酸化剤・粘結剤混合比は80/20である。酸化剤は、過塩素酸アンモニウムと過塩素酸カリウムとを80/20の重量比で混合したものをを用いた。またアルミニウム粉末2.4W%を含む。この推進薬の内部構造的特徴としては、酸化剤粒子の平均粒径が約10 μ mの1モード分布であることで、これまでに使用した一般的な推進薬^{1,1), 1,2)}(BP-17)では、その平均粒径が約350 μ m及び約40 μ mの2モード分布である点と比較して極めて特異である。また、試験片形状としては、図1.3に示す推進薬物性懇談会型の形状を採用した。

破壊エネルギー測定のために、次のような多重伸張試験を行なった。予伸び L_p まで一定伸張速度にて伸張し、

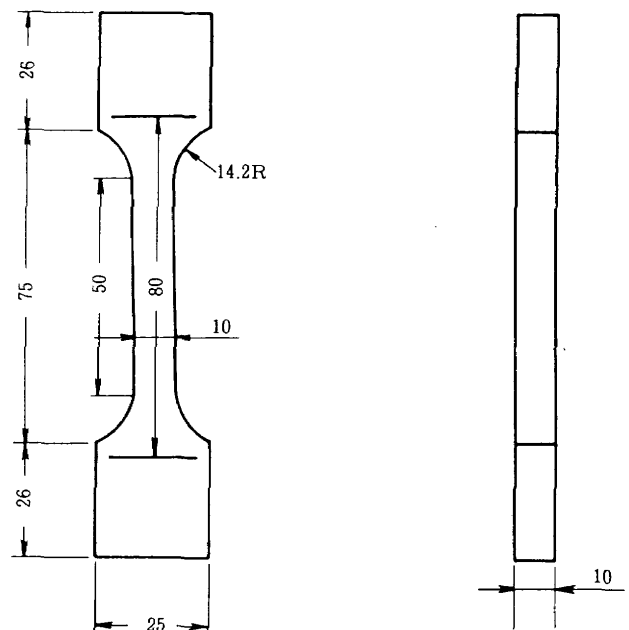


図1.3 物懇型試験片の形状寸法

そこで試験機（新興通信工業，TOM/200B）のクロスヘッドを圧縮方向への運動に切換える。クロスヘッドが伸張開始点に近づくとき、引張応力はしだいに減少し、ついには圧縮応力が作用するようになるが、これをできる限り小さくするように、クロスヘッド速度を落しながら伸張開始点に復帰させる。伸張開始点へ復帰後、圧縮応力はしだいに緩和するので、これが一定値に達した時に次の伸張を開始する。これを繰り返して多重伸張試験を行なった。この試験によって得られた応力・歪曲線のヒステリシス・ループの面積を測定したが、これは伸張過程に消費されたエネルギーに相当する。これには、破壊エネルギー（充填剤粒子と粘結剤との剥離エネルギーと、粘結剤部材の切断エネルギーの和）だけでなく、熱エネルギー、微細構造の破壊に伴う音響エネルギー（これを利用したアコースティック・エミッション法が近年、極めて発展してきた。）等を含むが、熱エネルギーは疲労試験（試験周波数は通常900~1,800rpm, 15~30Hz）では当然問題となるであろうが、本試験では試験周波数が5~0.1rpm（約0.1~0.002Hz）と極めて低いので、音響エネルギーと共にとりあえず無視した。実験条件としては、実験温度 $T=20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、伸張速度50mm/min

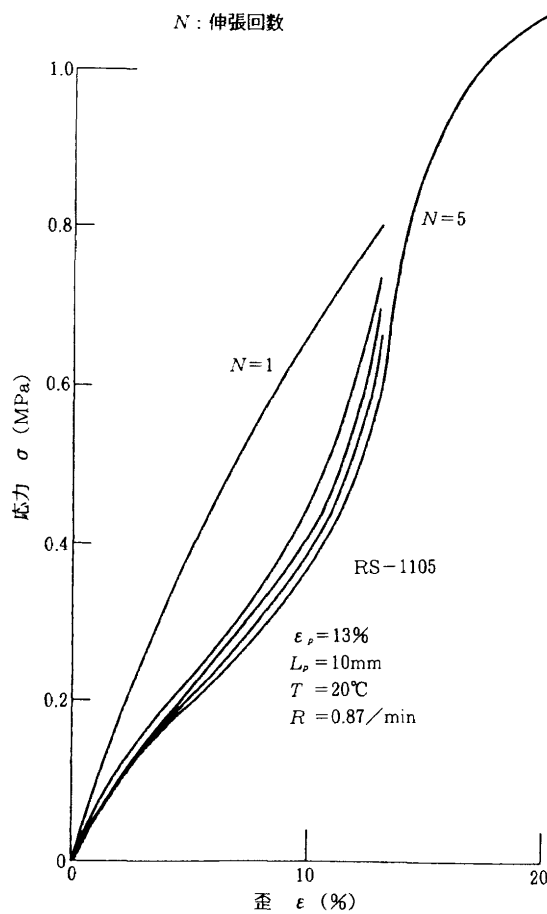


図1.4 RS-1105推進薬の多重繰返し伸張試験における応力-歪曲線（予歪=13%）

（歪速度 $R=0.87/\text{min}$ ）、予伸びレベル $L_p=5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 55\text{mm}$ 、伸張繰返し数 $N=5, 11, 70$ を採用した。

1.4 試験結果と考察

図1.4~図1.6に多重伸張による応力・歪曲線の変化の代表例を示す。いずれも“Mullins”効果^{1,5)}による弾性率の低下が認められる。図1.6の $N=1$ の曲線により、本推進薬（RS-1105）の弾性率 $E=53.0\text{MPa}$ 、最大応力 $\sigma_m=1.06\text{MPa}$ が得られるが、これらは以前に使用したBP-17推進薬の場合（図1.7~図1.8^{1,2)}）に示

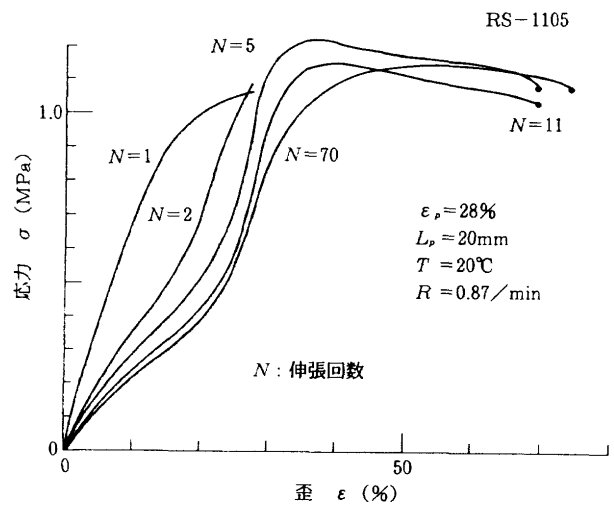


図1.5 RS-1105推進薬の多重繰返し伸張試験における応力-歪曲線（予歪=28%）

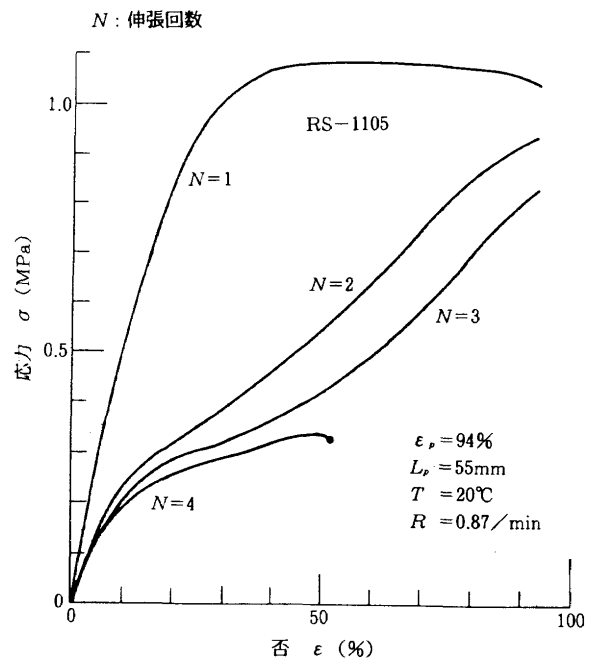


図1.6 RS-1105推進薬の多重繰返し伸張試験における応力-歪曲線（予歪=94%）

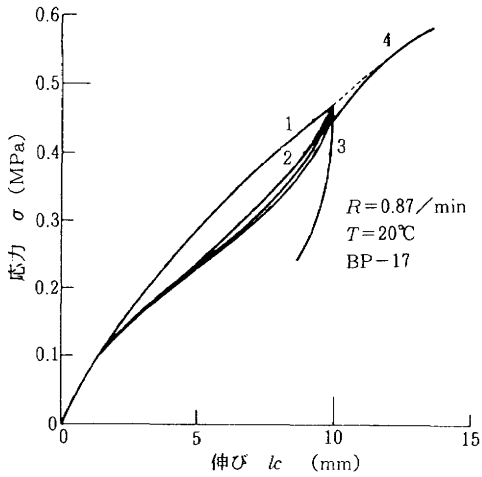


図1.7 BP-17推進薬の多重繰返し伸張試験における応力-伸び曲線(予伸び=10mm)

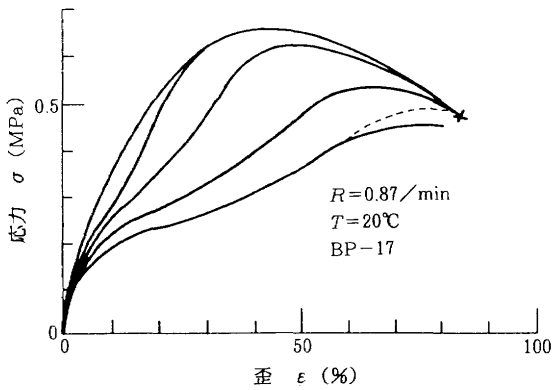


図1.8 BP-17推進薬の1回繰返し伸張試験における応力-歪曲線

す曲線より $E=35.6\text{MPa}$, $\sigma_m=0.66\text{MPa}$ となる。)に比較して50~60%位大きい。最大応力時の歪 ε_m は約60% (RS-1105) と40% (BP-17) であるが, RS-1105の方が, 最大応力に達した前後の応力の低下が極めて小さく, ほぼ一定の応力状態が破断歪の少し前まで続く点に特徴がある。また破断応力 σ_b , 破断歪 ε_b は, かなりバラツキはあるが, やはりRS-1105の方が $\sigma_b \approx 0.9\text{MPa}$ で約100%, $\varepsilon_b \approx 100\%$ で約20%程, BP-17より大きい傾向にある。

また図1.4の $N=5$, 図1.5の $N=2, 5, 11$ において, 予伸びよりやや大きい伸びレベルにおいて処女曲線より応力が大となっている点が注目され, これは図1.7~図1.8に示すBP-17には認められない。さらに $N=70$ では, この傾向は消失している。この原因としては以下のことが考えられる。

(1) $L_p=20\text{mm}$ では, 充填剤粒子と剝離して形成された網目構造の粘結剤部材のうちで, 破断直前のひずみを受けたものは, 部材内高分子が伸張方向に配向し, 弾性率が上昇する, いわゆる“伸び切り

り効果”を示す。

(2) 本試験でのRS-1105推進薬は, 一般的な推進薬BP-17に比較してその充填剤粒子が極めて細かい1モード分布のため, 剝離過程によって形成された粘結剤の細目構造の粘結剤部材の長さは極めて短かく, また単位体積当りに含まれる数が極めて大きい。そのため, “伸び切り効果”の影響が顕著である。

(3) 多重伸張の進行と共に“伸び切り効果”を示した部材の中で, 切断するものが増加し, その影響が失われて行くので, 図1.5の $N=70$ では, ほぼ, その影響が消失する。

これと関連して, 図1.6の $N=1$ の曲線が最大応力に達した前後で, 応力がほとんど低下しない原因として, 推進薬単位体積当りに含まれる“伸び切り効果”を示す粘結剤部材の数が, ほぼ一定となることが考えられる。この場合, 伸張するにつれて, 粘結剤部材は次々に“伸び切り効果”を示し, その数は増加するが, 一方で“伸び切り効果”を示した粘結剤部材は次々に切断して行き, その数は減少する。この増加と減少とがほぼつり合って, その数がほぼ一定に保たれる。

また, 図1.9に応力・歪曲線のヒステリシス・ループの面積に相当する破壊エネルギー(単位体積当り) ENn と予伸び L_p との関係を示す。 ENn は L_p の増加と, 繰返し数 n (ENn は応力・歪曲線 ($N=1$) と ($N=n+1$) とによる閉ループ面積に相当。) の増加と共に増大している。同一予伸びレベルでは, 繰返し数 n に対する破壊エネルギー ENn の関係は, すべての予伸びレベルを通じて, 実験式

$$(EN_n - EN_1) / EN_1 = K \log n$$

にて, 図1.10に示すように, ほぼ整理しうる。但し,

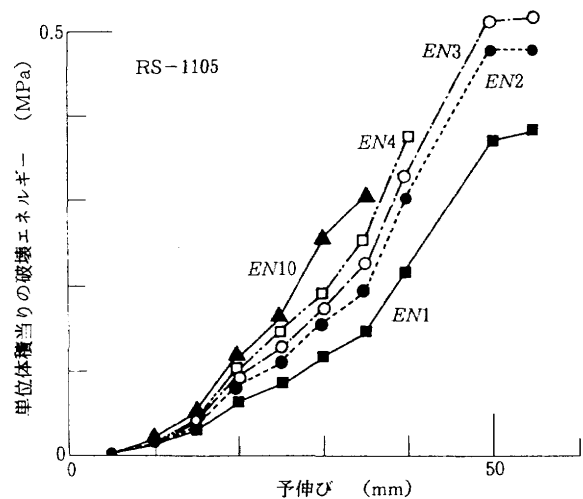


図1.9 破壊エネルギーと予伸びとの関係

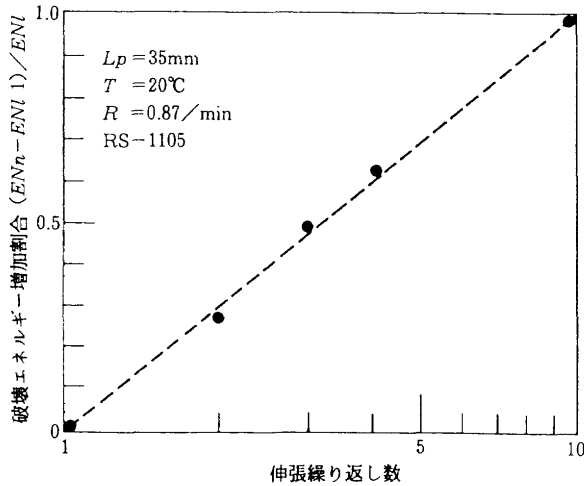


図1.10 破壊エネルギーと繰り返し伸張回数との関係

この式の中の K の値は予伸び L_p の関数で、図1.11に示すように、 L_p の三区区分において、ほぼ一定となる。さらに、図1.9に示す破壊エネルギーの増大の勾配が、やはり三区区分にてほぼ一定となり、しかも、その三区区分を区分する歪レベル $\varepsilon = 20, 80\%$ が、伸びにて示すと $L_p = 15, 50\text{mm}$ となり、図1.11の区分の場合と一致する。このことは、この三区区分が複合固体推進薬の破壊過程における剥離過程、粘結剤切断過程、全体的破断の三過程の区分に対応しているとも考えられる。

また、図1.2のE-F-G-Hの変曲点結合線は、粘結剤部材の変曲点結合線に対応すると考えると、図1.2内に示すようにCTPBの変曲点は $\varepsilon = 200\%$ であり、一方図1.5、図1.6より、RS-1105推進薬の対応する変曲点の歪レベルは、 $\varepsilon = 15 \sim 30\%$ であるので、歪集中度率は7~15と算出される。

さらに、破壊エネルギーは、発生したクラックの表面積（投影面積の2倍）に比例しているので、伸張と共に図1.9に示す破壊エネルギー・伸び特性と同様の特性を示すことになる。そこで、CTPBの破壊エネルギーの測定データ^{1.6)}を利用して、切断過程での単位体積当りのクラックの表面積の総和を求めることができる。例えば、破断時の単位体積当りのクラック表面積の総和は、粘結剤有効体積率20%、歪集中度率10、ひずみ速度1mm/minとすると、 $EN1 = 3.8 \text{ kg/m}^2$ では、 1 cm^3 当り 7.7 cm^2 と試算できる。

以上に示したように、推力大きさ制御型固体ロケット・モータ用複合固体推進薬のRS-1105の応力・歪特性、破壊エネルギー等の力学的特性が明らかとなった。これらは、一般的複合固体推進薬BP-17と比較して、モータ設計上特に問題となることはないと考えられる。但し、製造に関しては、単一モードの微細粒子を含むため、スラリー状態時の流動性が、粒子充填率の比較的低い場合にも低いので、粒子充填率をあまり高くできない点が今後

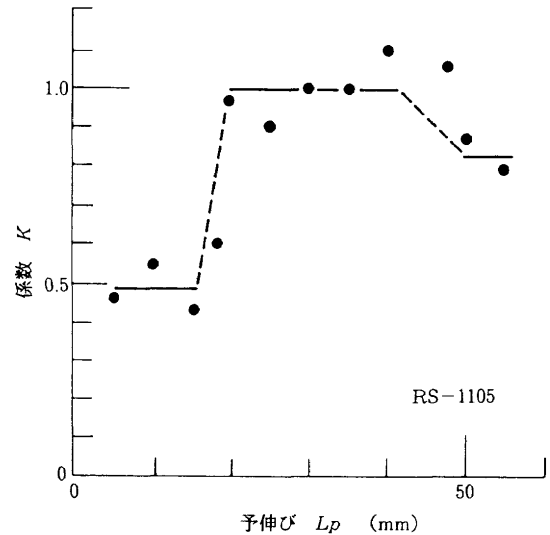


図1.11 (1.1) 式の係数 K と予伸びとの関係

の課題であろう。この点に関しては、一般的複合固体推進薬にて成功した新種粘結剤HTPB (Hydroxyl-Terminated Polybutadiene) の適用が望まれる。

尚、上段モータ、特にアポジ・モータは高高度にて作動させることになるが、多くの場合は、着火特性を改善するためにノズルに栓をしているので、さほど真空環境に曝されない。但し、固体推進薬の真空環境曝露による各種特性変化を測定しておくことは必要であろう。この観点から、航技研では推進薬試験片での密度、強度、小型モータ試験での燃焼諸特性への真空環境曝露効果の研究を行っているので参照されたい^{1.7)}。

1.5 まとめ

複合固体推進薬の破壊過程の研究の一環として、微細な充填剤粒子を含む、推力大きさ制御型固体ロケット・モータのCTPB系複合固体推進薬を採り上げ、多重繰り返し伸張試験により、応力・歪特性、破壊エネルギー等の力学的特性を実験的に明らかにすることができた。その結果、破壊過程に対する新たな知見を得た。今後、推進薬のより多数回の繰り返し伸張試験、つまり疲労試験が必要となる段階が来るであろう。

1.6 参考文献

- 1.1) M. Shimizu, T. Tanemura; Proc. 17th Japan Congress on Materials Research, The Society of Materials Science, Japan 1974, pp. 148-151.
- 1.2) M. Shimizu, T. Tanemura; Proc. 1974 Symposium on Mechanical Behavior of Materials, The Society of Materials Science, Japan, Vol. 1, 1974, pp. 589-598.
- 1.3) 五代富文, 藤原 勉, 清水盛生, 種村利春, 伊藤

克弥;航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-461, 1976年7月.

- 1.4) 例えば, 河田幸三, 井田峯人, 本堂 明; 東京大学 宇宙航空研究所報告, 第5巻, 第4号, 1969年10月, p. 521.
- 1.5) L.Mullins, N.R.Tobin: Rubber Chemistry and Technology, 30, 1957, pp. 555-571.
- 1.6) 国尾 武, 隆 雅久, 深井信義, 「材料」, 第20巻, 第214号, 1971, p. 74.
- 1.7) 清水盛生, 伊藤克弥, 種村利春, 藤原 勉, 五代 富文; 航空宇宙技術研究所資料, NAL-TM-414, 1980年4月.

第2章 破壊過程の微細観測による破壊基準

2.1 まえがき

現在, 宇宙用固体ロケットの推進薬としては, 主に高分子粘結剤中に酸化剤粒子および金属粒子を含む複合固体推進薬が用いられている。ロケット・チャンバ内に充填された固体推進薬に欠陥・破壊が生じると, 推進薬燃焼面積が増大し, ロケット・チャンバ内圧が増大するので, ロケットの推力は予定値よりずれ, 従って予定した軌道にペイロードを投入することができなくなるばかりか, 推進薬の欠陥・破壊の位置・程度によっては, ロケット・チャンバが爆発することもあり, 多大の損失を招くおそれがある。

固体ロケットの信頼性向上のためには, 推進薬の破壊基準を確立する必要がある^{2.1)}。複合固体推進薬は, 材料強度学的には「粒子充填ゴム系複合材料」と考えられ, 大変形, 粘弾(塑)性, 複合材料特性を示す解析困難な材料である。従って, その破壊基準の確立のためには, 特にその破壊過程の微視的研究が必要となる。この点についてはすでに Wiegand^{2.2)}, Bills^{2.3)}, 河田^{2.4)} その他の研究がある。これらによれば複合固体推進薬の破壊過程は大略,

- (1) 非剥離過程
- (2) 充填剤粒子と高分子粘結剤との剥離過程
- (3) 高分子粘結剤の切断過程
- (4) 全体的破断

となる。しかし, これら各過程の巨視的応力・歪曲線との対応, き裂発生・伸展挙動, さらにそれらの温度・時間依存性に関しては必ずしも十分には明らかでない。

ここでは, 複合固体推進薬の破壊過程を広範囲な温度・歪速度条件下で微細に観測するために, 小型引張試験機, 恒温槽, 光学顕微鏡を組合せた「固体推進薬破壊過程微細観測機」を試作し, これによる複合固体推進薬の破壊過程の観測, 破壊特性の測定を行なった結果について報告する。

2.2 設計方針

本機は, 複合固体推進薬の破壊過程を種々の条件下にて観測するためのものであるから, 引張試験機, 恒温槽, 光学顕微鏡の最適のものを設計製作し, これを結合することが望ましい。しかしながら, これは予算的, 時間的にも困難であるので, 現実的選択としては, これら三部分は市販品を多少修正改造した程度のものを想定せざるを得ない。

2.2.1 引張試験機部

複合固体推進薬は粒子充填ゴム系複合材料の一種であり, 粘弾性特性を示すので, 引張速度の広範囲な選択が可能であるものが望ましい。このためには, いわゆるインストロン型のものが最適であろうが, これは一般に極めて高価であり, かつ大型である。複合固体推進薬の抗張力は温度20℃では1 MPa以下, -40℃でも4 MPa程度であり, 一般的インストロン型試験機(荷重容量10~200kN)はむしろ不適であろう。その上, 顕微鏡観測の対象となる試験片はその大きさがある程度小さくても良いと考えられるので, ここでは荷重容量が小さすぎるきらいはあるが, 他に適当なものが見当たらないので, 高分子単繊維用インストロン型小型引張試験機 UTM- (東洋測器(株)製, 最大荷重50N, 引張速度2~40mm/min)を基本とした。但し, この試験機では試験片の伸長と共に顕微鏡による被観測部分(通常は試験片の中央部)は, 下部クロスヘッド速度の約半分速度で下方に移動するため, 顕微鏡による追尾が困難である。この移動速度をほぼ零にするために, クロスヘッド駆動用シャフトの上半分に逆ネジを切り, そこに上部可動クロスヘッドを設置して, 試験片を上下両方向に等速度で伸長するように改造(図2.1参照)した。この改造のため, 引張速度はクロスヘッド速度の2倍となる。本引張試験機部の主要仕様を表2.1に示す。

2.2.2 恒温槽部

近年, 複合固体推進薬の粘結剤として多く用いられている末端カルボキシル基化ポリブタジエン(Carboxyl-Terminated Polybutadiene, 略してCTPB)は常温ではゴム弾性を示すが, この特性は粘結剤として, 推進薬の満足すべき特性・強度を得る上で必要である。ゴム弾性はエントロピー弾性とも言われ, 高分子物質を構成する高分子鎖の熱的動揺によるものであり, 従って, 低温ではこの性質は失われ, 金属結晶と同様なエネルギー弾性を示すガラス状態となる。エントロピー弾性→エネルギー弾性の遷移の生ずるガラス遷移温度は, CTPBでは約-80℃であり, また最近 CTPBに代って酸化剤粒子等のより高充填率化による高性能推進薬に用いられつつ

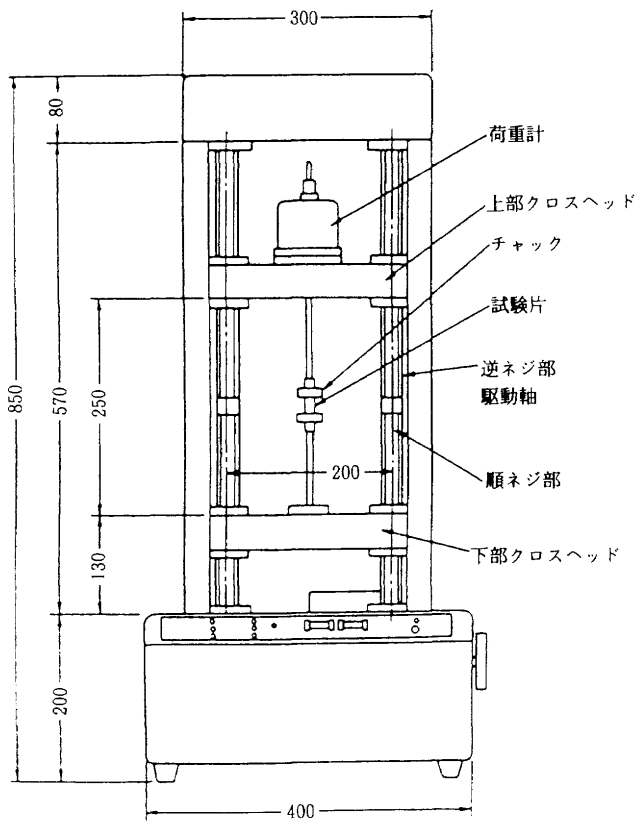


図 2.1 引張試験機部

表 2.1 引張試験機部主要仕様

引張駆動部	電子速度制御式
荷重範囲	最大50N
ストローク	有効50mm (片側クロスヘッド)
ストローク	最小0.05mm, 最大200mm
表示目盛	
引張速度	0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2 0.4, 1, 2, 4, 10, 20, 40mm/min×2 (伸び量設定による繰返し伸長試験可能)
引張速度精度	設定値に対して±1%以下
速度変換方式	チェンジギヤ方式 (バックラッシュ防止装置付)
チャック	50N 用, 10N 用 (0.8N 兼用)
駆動モータ	同期モータ10W
電 源	AC100V 50~60Hz
機体寸法	400×450×850mm
荷重検出部	ストレイン・ゲージ型
型 式	TBL-5LF-II (50N) TBL-1LF-II (10N) TLU-0.08LF-II (0.8N)
ゲージ抵抗	350 Ω
定格出力	1.25mV/V
記録計	自動平衡式
型 式	SS-205D-UTM
目 盛 幅	200mm
定格出力	AC0.5mV/V
倍 率	2 倍連続可変
応動速度	フルスケール約1秒
精 度	±0.5 %
紙送り速度	10, 20, 50, 100, 200, 500mm/min
変速方式	ロータリー方式
電 源	AC100V 50~60Hz

ある末端水酸化ポリブタジェン (Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, 略してHTPB) の場合にも大差はない。一方、推進薬製造における硬化温度は約60℃であり、さらに推進薬の自然発火温度、CTPBの融点は200~400℃のようである^{2,5)}。このような温度範囲を一つの恒温槽でカバーすることは困難であり、また、固体ロケットの製造から発射までの保存期間では、何らかの事故の

ないかぎりそれほど高温になることは想定されないもので、ここでは-100℃~+60℃の範囲を指定した。但し、一般の引張試験機用恒温槽では、外部から内部の試験片を光学顕微鏡観測することは困難であり、また市販の顕微鏡用恒温槽としては透明プラスチック・ケースに顕微鏡

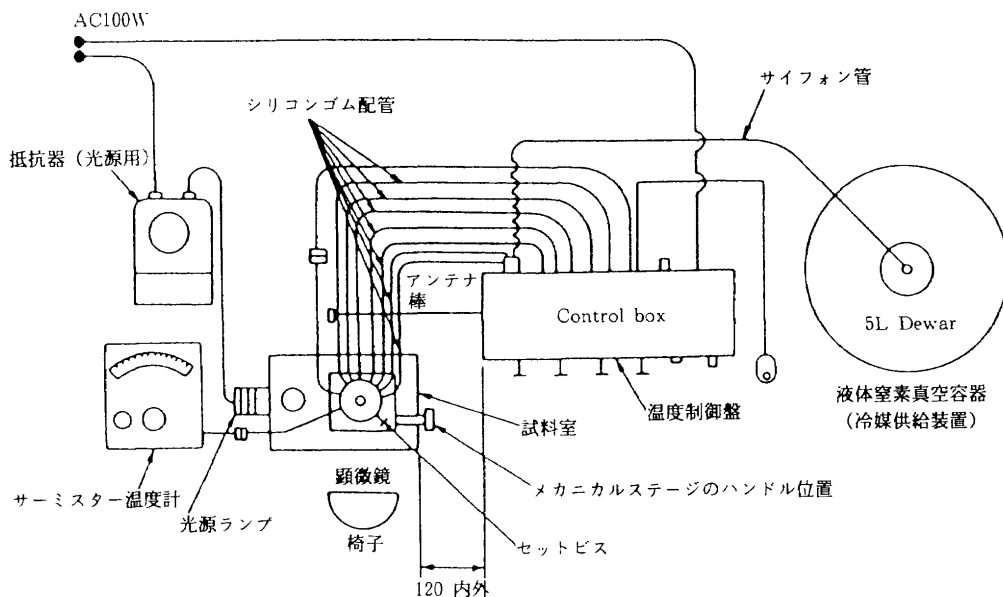


図 2.2 ニコン低温顕微鏡 NE 型の構成

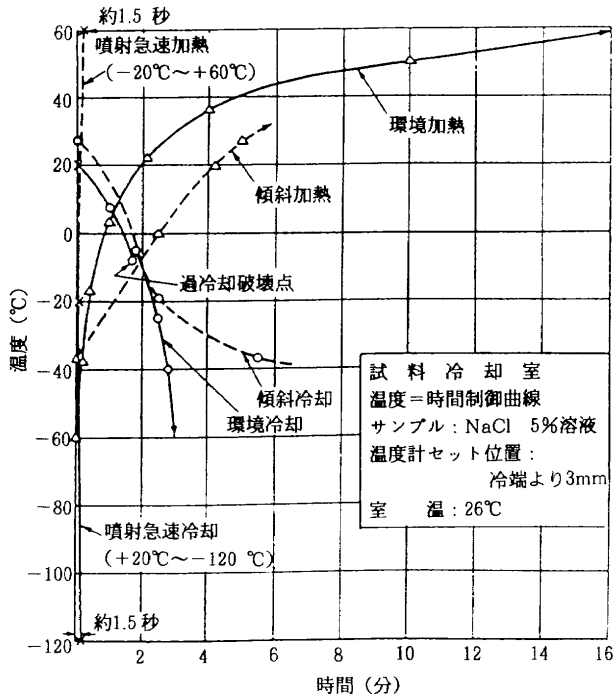


図 2.3 ニコン低温顕微鏡 NE 型性能表

を収め、その内部を温度制御する方式が普通であり、引張試験機と組合せることは困難である。広範な市販品調査の結果、ニコン低温顕微鏡NE型^{2,6)}の低温装置がその性能・形状が、一部改造により目的達成可能と考えられた。この低温装置は、冷凍食品の研究を目的として、低温下における各種生物、病原菌、生体組織等の活動状態や生活反応の顕微鏡観察を行なうために開発されたもので、図 2.2 にその構成を、また図 2.3 にその温度特性を示す。その特長は

- (1) 常温の実験室，研究室の卓上で使用できる。
(冷凍室は不要)
- (2) 通常の光学顕微鏡に簡単に取り付けられる。
(透過照明，反射照明両用)
- (3) 温度制御範囲が広い。
 - ・温度範囲 $-120^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$
 - ・傾斜冷却・加熱 試料に温度勾配を発生させる。
 - ・急速冷却 試料に直接液体窒素を吹きつける。
 - ・急速加熱 試料に直接加熱窒素ガスを吹きつける。
- (4) 光学系のくもり・氷結防止機構付
資料冷却室の観測窓・照明窓には外気を遮断する特殊窒素ガスカーテン形成機構が設けられている。この機構は同時に対物レンズ，コンデンサーレンズ面をもクリアーに保つことができ，長時間，安定した観察が可能である。
- (5) 冷媒自動供給装置付
冷媒として採用された液体窒素はデュワー瓶から，

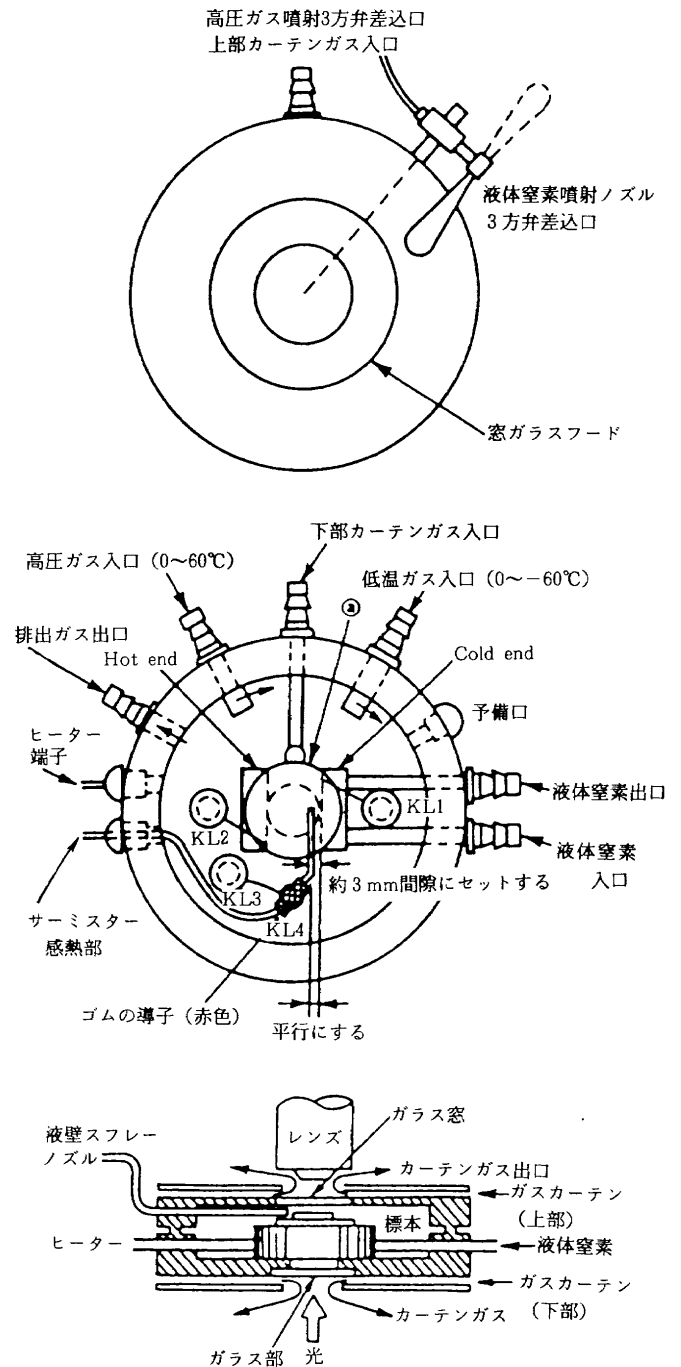


図 2.4 ニコン低温顕微鏡の試料室

液の気化蒸発圧を利用したサイフォン装置により温度コントロール・ボックスを経て，試料室に送られる。

この低温装置の試料室の構造は図 2.4 に示すように，直径 $\phi 80$ ，長さ27mmで，中央に観察窓，照明窓があり，内部にサーミスタ温度センサ，傾斜冷却・加熱装置等が設置されているが，本観測機の恒温槽としては，傾斜冷却・加熱装置は不要であるので，これを除去し，上部と下部の壁に丸穴を設け，そこに引張ロッドを差し込み，その先端にチャックをつける等により本観測機の恒温槽に改造可能であると判断された。図 2.5 に改造された恒

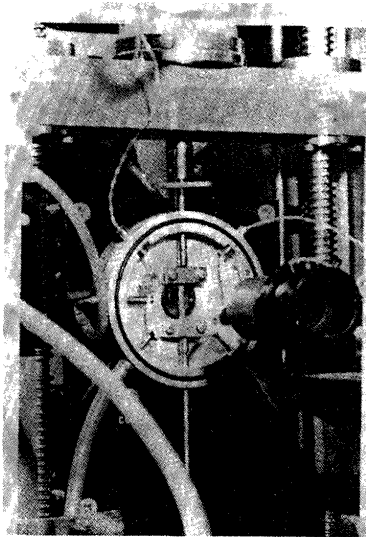


図 2.5 恒温槽の構造とチャック・試験片

温槽を示す。直径φ110，長さ47mmと一まわり大型化されている。温度計測は三段切換式サーミスタ温度計（宝工業（株）製PV-2V-M，-120℃～+100℃）と，銅・コンスタンタン熱電対温度計（（株）横河電機製作所製，デジタルマルチ温度計，Type 2809，-50℃～199℃±0.1℃）とを採用している。

この恒温槽の温度過渡特性を図2.6に示す。全温度範囲を30分程度でカバーすることができ，必要条件をほぼ満足できる。

温度制御系は，図2.2に示すものと同様であるが，10,000ccに容量倍増されたデュアー瓶内の液体窒素は，

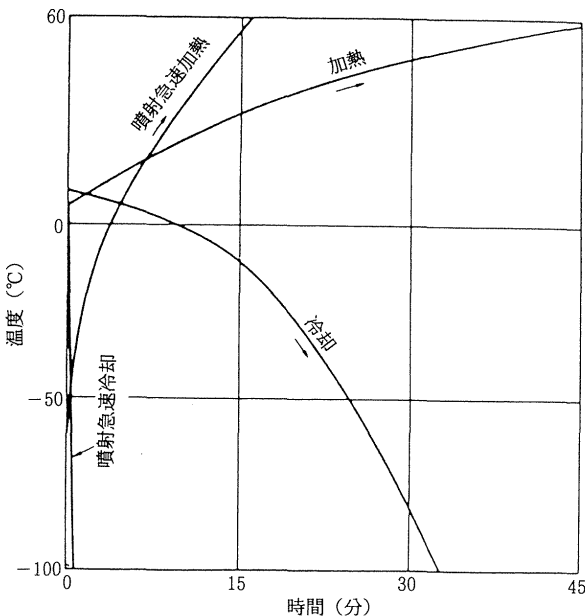


図 2.6 本観測機用改造恒温槽の温度制御特性（噴射急速加熱・冷却は加熱・冷却用ガスを直接資料に噴射した場合の特性を示す。）

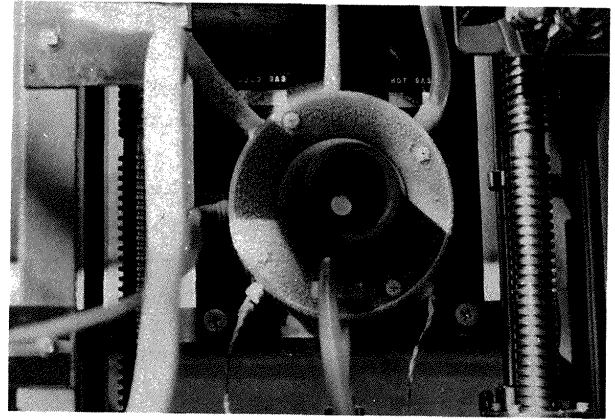


図 2.7 低温試験中の光学窓

サイフォン装置により温度コントロール・ボックスに送られ，ここで加熱等の処理をされて後，恒温槽に送られる。温度制御は手動方式で，温度計を見ながら温度コントロール・ボックスのヒータ・スイッチ，バルブ等を調節することにより，温度的平衡状態を作り出すことができる。熟練すれば±0.2℃の精度で制御可能である。なお，図2.7に低温試験中の観測・照明窓の曇りのない状況を示しておく。

2.2.3 試験片寸法

固体ロケット推進薬の物性・強度試験片としては，図2.8に示すような形状寸法が推進薬物性懇談会に提案されており，これは米国で採用しているものとほとんど同一である。一方，顕微鏡観察用としては小さい方が扱いやすいが，あまり小さくなると寸法効果により物型試験片によるデータとの差異が大きくなるおそれがある。ここでの寸法効果は，主として試験片幅と充填粒子の直径との関係に依存すると思われる。通常型推進薬に含まれる粒子のうち大きなものは約300μmであるので，試験片の一辺がその10倍となる寸法を限度として，図2.8の寸法の3/10の寸法の小型試験片を想定し，寸法効果試験を行なった。試料推進薬としては一般的な複合固体推進薬であるBP-17と，充填粒子の極めて細かい，推力大きき制御型（TMC）固体ロケット用推進薬RS-

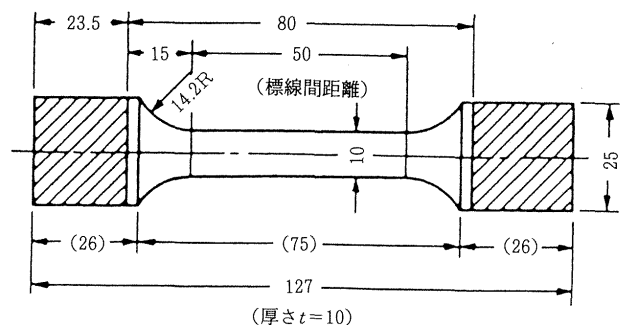


図 2.8 物型試験片寸法

表 2.2 供試推進薬の組成

薬種 組成	BP-17	RS-1105
粘結剤	CTPB 19 wt %	CTPB 19.5wt %
酸化剤	AP 65 wt %	AP 62.5wt % PP 15.6wt %
酸化剤 粒度分布	2モード 20~300 μm	1モード 10 μm 程度
金属粉末	Al 25 μm 16 wt %	Al 25 μm 2.4wt %

1105^{2.5)}とを採用した(表 2.2 参照)。使用した試験機は定引張速度型引張試験機 TOM200B (新興通信工業(株)製)に、エア・チャック(大伸長に伴う試験片の厚さ収縮によるチャック抜けを防止するのに、エア・チャックは極めて効果的である。)を装備したものである。1/1 試験片と 3/10 試験片の歪速度を同一とするために、1/1 試験片の伸長速度を100mm/min, 3/10 試験片の伸長速度を30mm/minとしている。

試験結果を表 2.3 に示す。両薬種とも、応力 3/10 試験片の方が小さくなっているが、破断伸びについては RS-1105 と BP-17 とでは逆の傾向となり、また充填粒子の小さい RS-1105 の寸法効果が、BP-17 に比較して必ずしも小さくない。これらがどのような機構によるものであるかについては、今後の研究課題であろう。しかしながら、1/1 試験片と 3/10 試験片とによる比較試験データを備えて、両者の相関関係を確立することは、両試験片による試験データがこの程度の差異ならば、可能であろう。

2.2.4 光学系

推進薬を顕微鏡によって観測、さらには写真・映画撮影する上での最大の問題点は照明法であろう。推進薬の多くはアルミニウム等の金属粉末を含むために、光を透過し難いので、通常の生物顕微鏡等に用いられる透過照明法は不相当である。他方、推進薬表面での光の反射率は、金属表面等に比して極めて小さいので、通常の金属

顕微鏡に用いられる落射明視野照明法を使うと、レンズ系や恒温槽の観測窓ガラス表面からの反射光量が試験片表面からの反射光量に比して無視できず、金属表面観測の場合のような鮮明な映像は、図 2.9 に示すように、得られない。つまり、光学的な S/N 比が極めて低下してしまうのである。このような場合の照明法として、あまり一般的ではないが落射暗視野照明法があり、上述の問題点を解決できる。しかしながら、市販の顕微鏡の落射暗視野照明装置は比較的光量が小さく、肉眼観測はなんとか可能であるが、写真撮影には数分間の露出時間を要するので、試験片の破壊挙動を追跡撮影することは不可能に近い。そこで、顕微鏡とは独立した、コンデンサー系とタングステン電球とからなる照明装置を用い、顕微鏡光軸と約 30° の角度を成す方向から斜光照明を行なった。さらに、光源としてキセノン管を採用し、写真のストロボ撮影により鮮明な映像が得られた(図 2.9 参照)。

また、破壊挙動追跡に関しては、映画撮影が特に有効と思われる。理想的にはムービー・カメラと照明装置のキセノン管と同期させることが考えられるが、手持ちのムービー・カメラはボレックス H16 で、これには同期信号出力が備わっていない。そこで次善の策として、光源にハロゲン・ランプ(15V, 150W)を採用し、高感度フィルムを使用して、33コマ/秒の撮影に成功したが、なお画面は暗く、画質もさほど良好とは言えない。またこの場合、照明光による試験片の加熱の問題があり、熱線吸収フィルタの使用によっても、なお十分には加熱を除くことはできない。やはり同期出力を有するムービー・カメラとキセノン管による同期撮影が、画質、ブレ、明るさ、色温度等について有利であろう。なお、組込まれた顕微鏡は日本光学工業(株)製の金属顕微鏡 S-M 型であり、その標準対物レンズは恒温槽中の試料にあまり近づくことはできないので、作動距離の長い対物レンズを用意している。

2.2.5 防振対策

光学系は試験片の被観測部を追跡できるように、XYZ 3 軸方向に手動による駆動可能な駆動系に、図 2.10 に示すように、組付けられている。このような装

表 2.3 固体推進薬の物性・強度に関する試験片寸法効果

特性	試験片	1/1 BP-17	3/10 BP-17	1/1 RS-1105
最大応力 (σ_m)		420 \pm 10 (kPa)	3.60 \pm 20 (kPa)	750 \pm 30 (kPa)
破断応力 (σ_b)		340 \pm 20 (kPa)	310 \pm 20 (kPa)	720 \pm 30 (kPa)
最大応力時の伸び (lm)		40.6 \pm 2.1 (mm)	45.8 \pm 2.7 (mm)	24.8 \pm 2.0 (mm)
破断時の伸び (lb)		85.4 \pm 5.3 (mm)	76.8 \pm 3.8 (mm)	61.4 \pm 7.2 (mm)

注 1. 数値は試験片 5 本の平均値 標準偏差の表示による。

注 2. 伸びについては、3/10 試験片の場合、測定値 \times 10/3 により表示している。

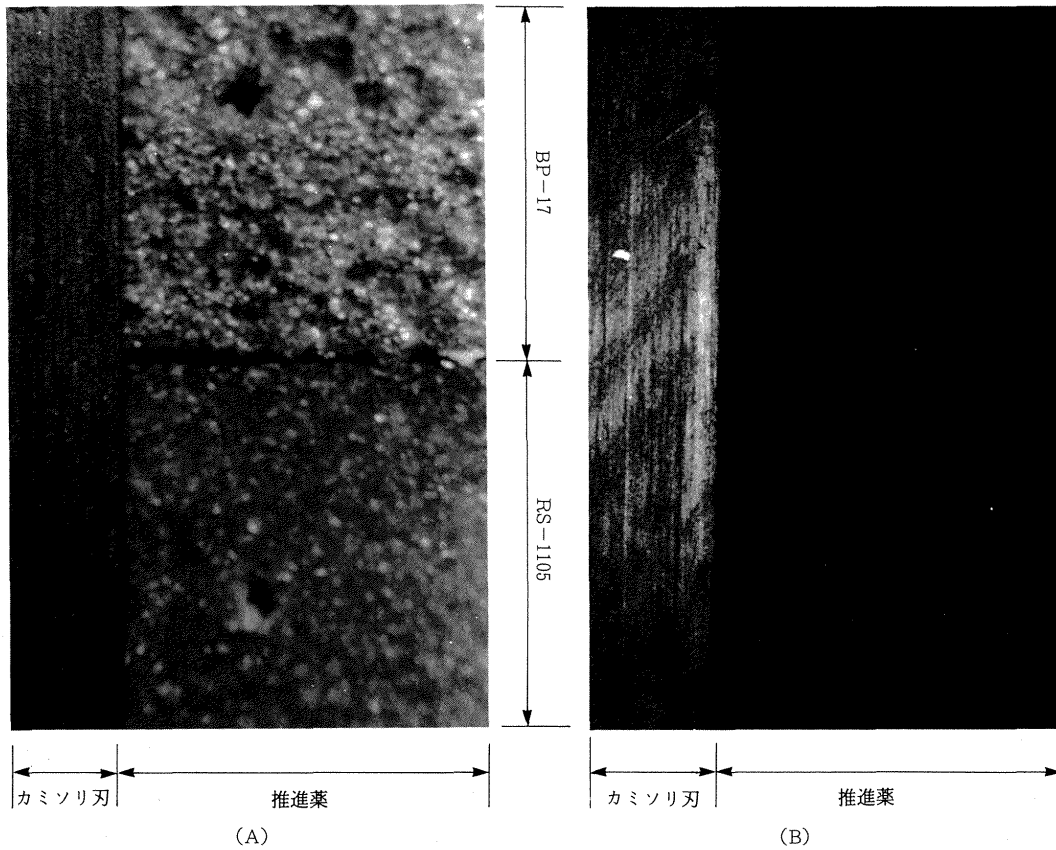


図 2.9 照明法による顕微鏡観察像の差異 ((A) : 斜光照明法, (B) : 落射明視野照明法)

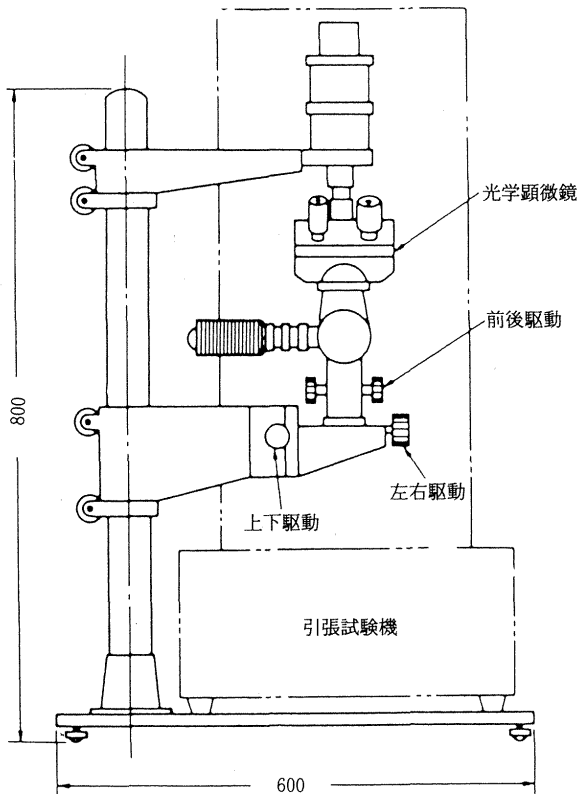


図 2.10 光学系駆動基台

置により試験する場合、引張試験機内部に10W同期モータおよびギア系が組込まれているので、ある程度の振動が生じ、従って光学系と試験片との相対振動が生じ、顕微鏡観測、特に高倍率の観測において問題となる。防振対策としては、図2.10に示すように、引張試験機を光学系駆動基台に設置し、引張試験機上部と基台支柱上部とを連結治具により連結固定する方式を採用した。その結果、満足すべき範囲内に振動をおさえることができた。

2.3 試作と予備試験

以上のような設計方針に基づき、本観測機を（その全体を図2.11に示す）を試作し予備的な試験を行ったところ、次のような結果が得られた。

- (1) 要求仕様の範囲内の温度環境下での低速伸長試験観測は比較的容易である。
- (2) 低温環境下での比較的高速の伸長試験を行う場合、荷重計の容量が不足しがちである。そこで引張試験機の駆動系・構造系には容量に余裕があるので、荷重計を50Nから200Nに容量拡大した。
- (3) 比較的高速の伸長試験において高倍率の観測を行なう場合には、光学系の手動駆動に熟練を要する。特に手動による写真撮影を並行して行なうことは、かなり困難であり、モータ・ドライブ撮影、ムービー撮影等が望ましい。

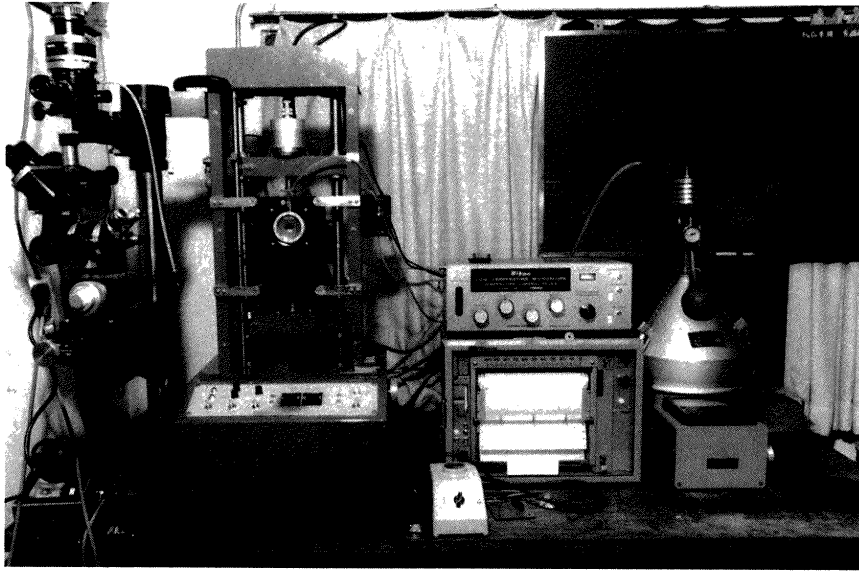


図2.11 固体推進薬破壊過程微細観測機の全体写真

(4) 推進薬の充填粒子は、大きいものでは数百ミクロンに達し、またある程度の厚さのある試験片を用いるので、空孔の発生、粘結剤の切断等を高倍率で観測する場合には焦点深度の不足が痛感される。場合によっては、光学顕微鏡以外の焦点深度のより大きい観測装置、例えば電子顕微鏡等の適用が期待される。

ここでは、固体ロケット・モータ製造時に脱泡等の不完全のために推進薬中に形成される空孔を模擬する円孔切欠試験を行った。

2.4 破壊特性の測定

これまでに述べたような、試作された固体推進薬破壊過程微細観測機により、複合固体推進薬の変形・破壊特性を微細に観測した結果について述べる。試料推進薬は前述のBP-17とRS-1105とである。

図2.12のような試験片(3/10物懇型試験片)の中央に、小型精密ボール盤にて0.4φの円孔貫通切欠を設け、これを本試験機にて単軸伸張したときの円孔切欠周辺の歪集中挙動、き裂発生を観測した。温度環境条件は-50℃と20℃とであり、ハロゲン・ランプ斜光照明とボレックスH16カメラによる16mmムービー撮影フィルムからのデータをプロットして、図2.13、図2.14を得た。-50℃の場合には、終期を除いて短軸(伸長方向と直

2.4.1 円孔切欠周辺の変形とき裂発生

粘結剤等の粘弾性材料に対する切欠試験は、Griffith流の破壊力学との関連でかなり報告^{2.7)}されているが、充填粒子を含む複合固体推進薬の切欠試験については、その取扱いの困難さのためか、報告が見当たらない。こ

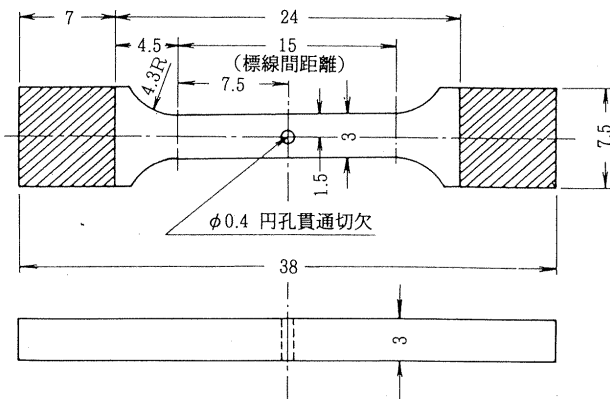


図2.12 φ0.4円孔貫通切欠付3/10物懇型試験片

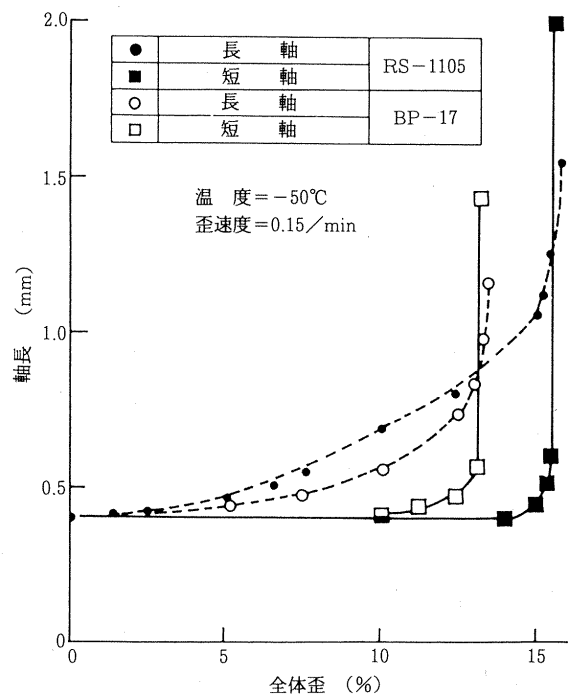


図2.13 丸孔切欠周辺の変形・破壊(-50℃)

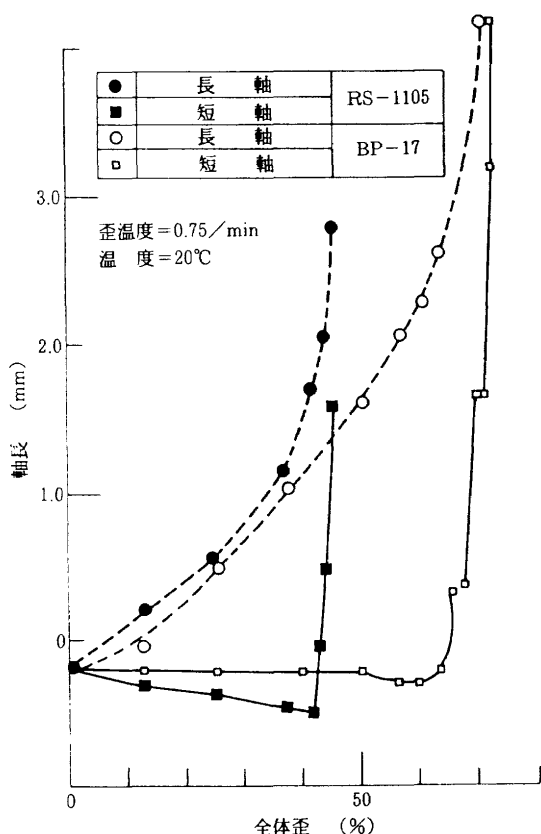


図 2.14 丸孔切欠周辺の変形・破壊 (20°C)

角なる軸)の長さはほとんど変化せず、一方長軸(伸長方向と一致する方向の軸)は全体歪の増大に伴ない、しだいに増加率が增大して行く。全体歪が10% (BP-17)、14% (RS-1105)に達すると、き裂が発生し、短軸長さプラスき裂長さははじめはゆるやかに増加するが、全体歪が13% (BP-17)、16% (RS-1105)にて急激に増加して破断する。

また、20°Cの場合には、-50°Cの場合に比して弾性率が小さく、破断歪も大きい。そのため変形からき裂発生・破断という過程は、-50°Cの場合と同様であるが、き裂発生時の長軸/短軸の値が、-50°Cでは2 (BP-17の場合)、3 (RS-1105の場合)であるのに対し、20°Cでは4 (BP-17の場合)、5 (RS-1105の場合)と約2倍となっており、またき裂発生時の全体歪、破断歪も約4倍となっている。このような円孔切欠の周辺の変形・破壊特性値は、固体ロケット・モータ内の推進薬中に形成された空孔を基点とする破壊に対する安全性評価の基準作成上、三次元空孔に対する2次元モデルにおけるデータとして有用であろう。

2.4.2 き裂開口変位の測定

近年めざましい発展を遂げつつある破壊力学は、材料強度研究の支柱の一つとなり、特に脆性材料に対して有効とされている。この破壊力学は、き裂の力学的分野、

すなわち応力拡大係数、歪エネルギー開放率、J積分等、き裂周辺の力学的応答量を解析する分野と、破壊のクライテリアの分野、すなわちこれらの応答量がある限界値に達した時にき裂発生・伸展が発生するという分野とから成っている。また、この理論は粘弾性材料へも拡張が行なわれており、複合固体推進薬の粘結剤のような粘弾性材料について、切欠効果^{2.7)}、応力拡大係数とき裂伸展速度とに関する報告^{2.8)}がある。

しかしながら、複合固体推進薬のような粒子充填率の高い、しかも大変形を生ずる粘弾性複合材料については、その理論的取扱いが困難でもあり、ほとんど明確にされておらず、わずかに切欠効果とその温度依存性^{2.9)}、破壊エネルギーの測定^{2.10)}等があるだけである。すなわち、図2.15に各種破壊力学模型を示すが、通常破壊力学模型である同図(a)、(b)では明らかに不十分である。また同図(c)は切欠というマクロ欠陥と切欠先端近傍の微小き裂というマイクロ欠陥とを結合した破壊力学として、主として金属材料にてその有効性が実証されている^{2.11)}。しかし、複合固体推進薬の一般的破壊力学模型としては、同図(d)のように、切欠というマクロと粘結剤中及び粘結剤・充填粒子界面の微小欠陥というマイクロの他に、剝離した充填粒子まわりの空孔というセミマイクロとが結合したものとなるが、これに大変形、粘弾性効果を含ませた理論的取扱いは極めて困難である。そこで、同図(e)のように簡易模型を想定した。すなわち、充填粒子を球でなく(実際の充填粒子は必ずしも真球度は良くない)、立方体の角を落として、その中央断面が正八角形となる形状とした。また、粘結剤は非晶質高分子材料であるので、内部微小欠陥を転位論的に取扱うことは困難であり、その粘性効果と共に無視した。従って、この模型は、切欠の先端に正八角形介在物をはさんで粘結剤仮想小型試験片が並んだものとなり、切欠先端の大変形により仮想小型試験片が破断歪まで伸長され、破断することにより、き裂が発生・伸展することになる。この模型は、このように切欠先端の大変形効果を取入れている。一方、金属材料においても、低温における低応力脆性破壊においては、応力拡大係数による破壊基準の適用がかなりの成功を収めているが、高応力脆性破壊では適用はむづかしく、延性破壊ではほとんど不可能である。この問題について Tetelman 等^{2.12)}は、同図(f)のように切欠先端に小型仮想試験片を並べた、き裂(先端)開口変位理論(C(T)OD理論)を提唱しており、上述の同図(e)の模型は、Tetelman 模型を粒子充填材料に適用可能とするための一発展形態と言えよう。この模型にもとづき、ここでは、複合固体推進薬のき裂開口変位を、試作した破壊過程微細観測機により測定し、これに、き裂発生・伸展の限界値が存在するかどうかを実

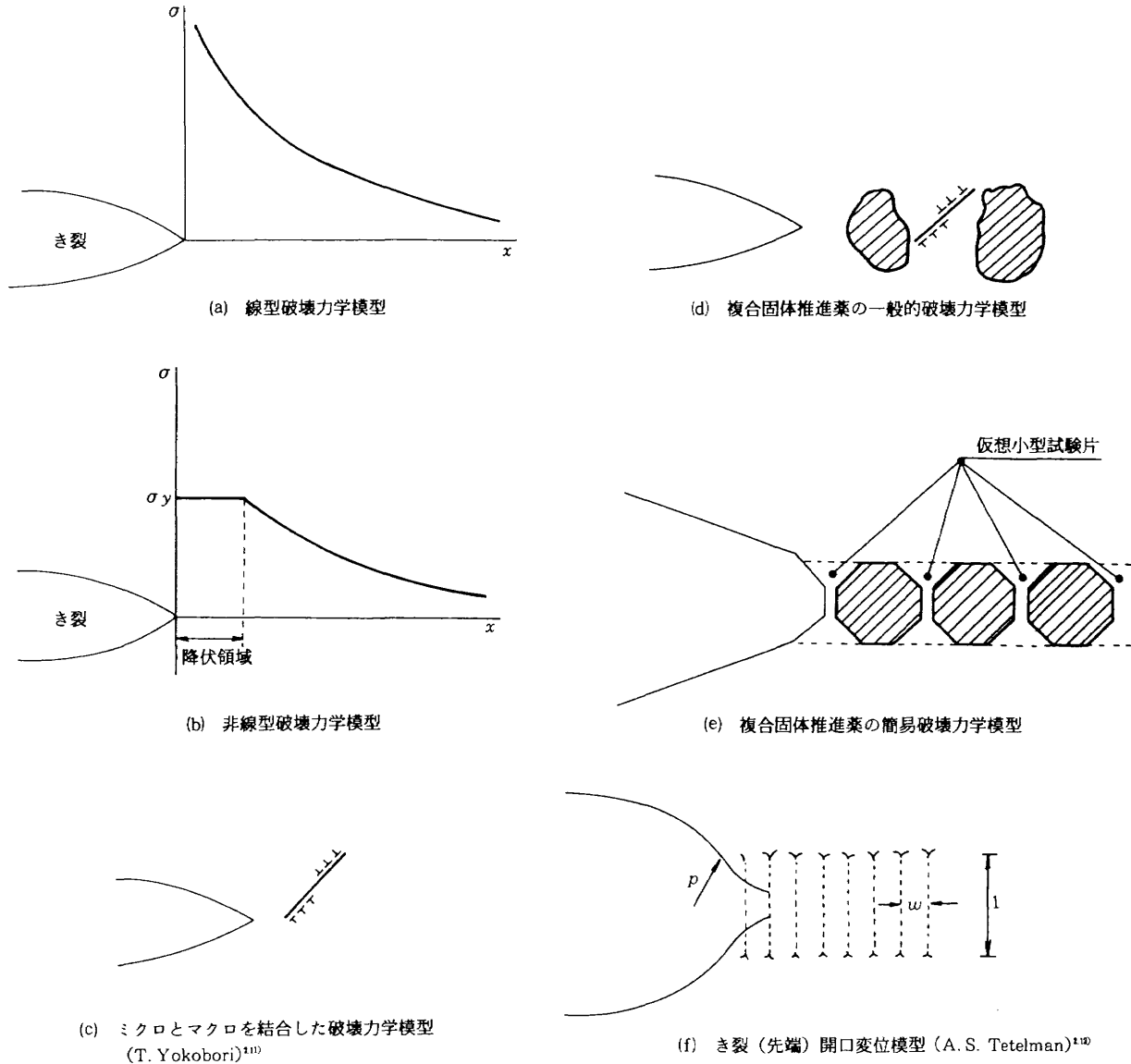


図 2.15 各種破壊力学模型

験的に調べた。

使用した推進薬はBP-17とRS-1105とであり、試験片形状は短冊状を採用し、その側面部にカミソリ刃により深さ約1mmの切欠を図2.16のように設けた。この試験片を-50℃と20℃の温度環境下で単軸定歪速度(0.15/minと0.75/min)伸張試験を行った。その結果

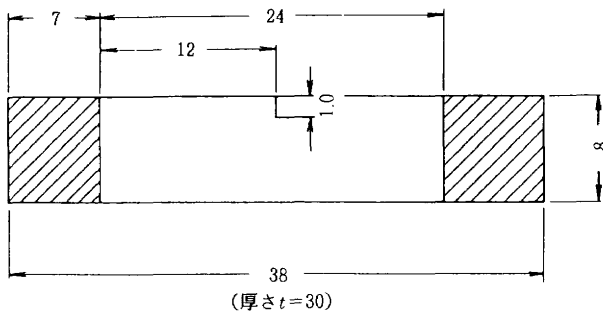


図 2.16 カミソリ刃による切欠付短冊状試験片

を図2.17～図2.20に示す。これらはボレックスH16による16mmムービーフィルムより、き裂長さ、き裂開口変位を読み取ってプロットしたものである。BP-17の場合には充填粒子の粒度分布は2モードで、大粒の平均直径は約0.30mmであり、従って、図2.15(e)の仮想小型試験片の平行部の長さは、正八角形断面充填粒子の仮定から0.14mmとなる。一方、RS-1105の場合には、アルミニウム粒子の平均直径0.025mm、酸化剤粒子の平均直径は0.01mm以下なので、仮想小型試験片の平行部の長さは0.01～0.004mm以下となる。図2.17ではき裂開口変位 δ が0.8mmとなると、き裂が発生・伸展しており、限界き裂開口変位 $\delta_c=0.8$ mmとなるが、これは図2.15(e)の仮想小型試験片の破断歪 $\epsilon_{ib}=0.8/0.14=5.7$ であることになり、仮想小型試験片の歪集中を10とすると^{2.4), 2.10)}, 歪速度 $10 \times 0.15/\text{min}$, 温度 -50°C でのCTPBの破断歪 $\epsilon_b=6.0$ ^{2.13)}であることとほ

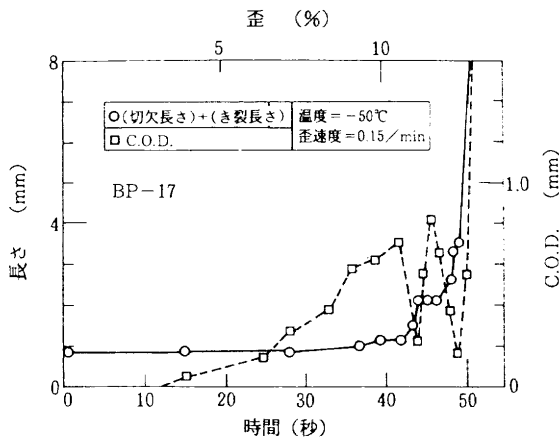


図2.17 BP-17推進薬のき裂発生・伸展とき裂(先端)開口変位との関係(-50°C)

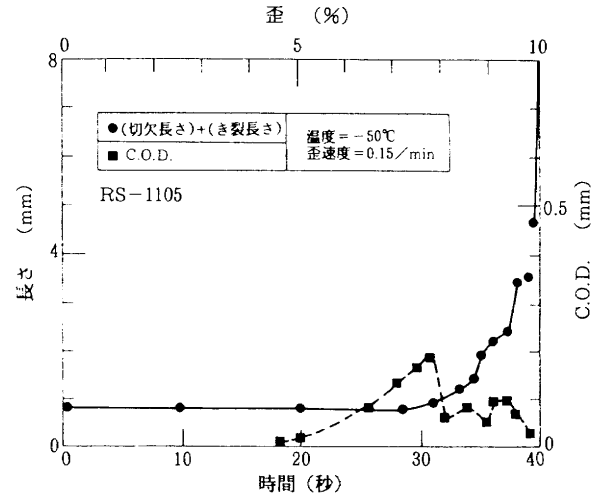


図2.19 RS-1105推進薬のき裂発生・伸展とき裂(先端)開口変位との関係(-50°C)

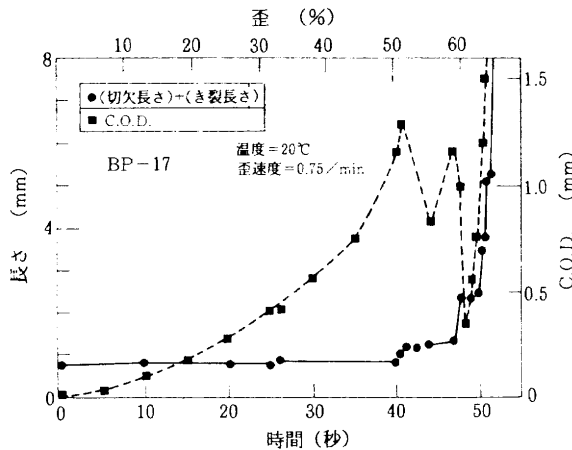


図2.18 BP-17推進薬のき裂発生・伸展とき裂(先端)開口変位との関係(20°C)

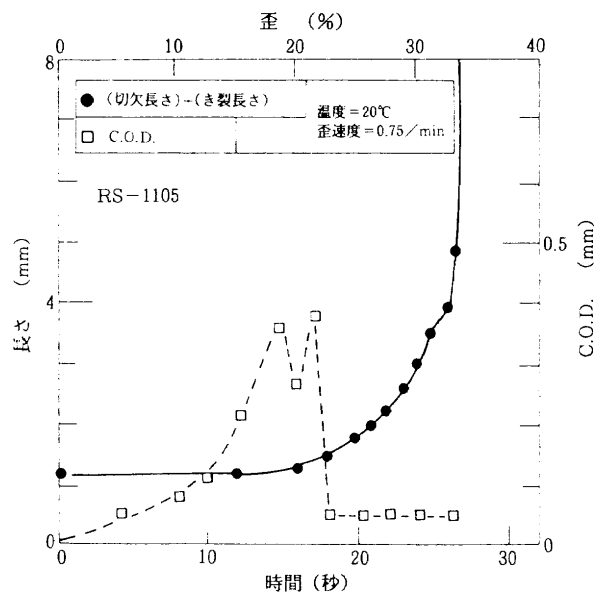


図2.20 RS-1105推進薬のき裂発生・伸展とき裂(先端)開口変位との関係(20°C)

ば一致する。また図2.18では $\delta_c \approx 1.2 \text{ mm}$ であり、仮想小型試験片の破断歪 $\epsilon_{ib} = 1.2 / 0.14 = 8.6$ となり、CTPBの歪速度 $10 \times 0.75 / \text{min}$ 、温度 20°C での破断歪 $\epsilon_b \approx 8.0^{2.13}$ であることとほぼ一致し、図2.15(e)の模型による、き裂開口変位理論が、BP-17についてはほぼ成立することになる。

またRS-1105については、図2.19に示すように $\delta_c \approx 0.2 \text{ mm}$ であり、仮想小型試験片の破断歪 $\epsilon_{ib} = 0.2 / 0.01 \sim 0.2 / 0.004 = 20 \sim 50$ となる。また図2.20の場合には $\delta_c = 0.3 \text{ mm}$ となり、仮想小型試験片の破断歪 $\epsilon_{ib} = 0.3 / 0.01 \sim 0.3 / 0.004 = 30 \sim 75$ となり、いずれもCTPBの破断歪より約1桁大きい(これらの結果を表2.4に示す)。この原因としては、BP-17の場合には充填粒子は約 $350 \mu\text{m}$ 径の大粒と $40 \mu\text{m}$ 径の小粒の2モード分布であるのに対し、RS-1105の場合には $10 \mu\text{m}$ 径以下の1モード分布であるため、推進薬製造時に粒子が粘結剤中に十分分散せず、数個~数十個が凝集した状態であちこちに分散して存在し(図2.21参照)、見掛上の充填粒

子径が1桁大きくなっているため、仮想小型試験片の長さも1桁大きくなり、 δ_c も1桁大きくなっていることが考えられる。また図2.20では、き裂発生後一旦はき裂は停留するが、ふたたび伸展しはじめると、1桁小さいほぼ一定の δ_{dc} にて、き裂は少しずつ加速しながら伸展し、破断に至る。図2.19では、図2.17、図2.18と図2.20との中間的挙動が認められる。すなわち、比較的大きな δ_c にて、き裂は発生し、図2.20と同様に δ_c よりかなり小さい δ_{dc} にて、き裂は伸展するが、その挙動は図2.20に比してかなりギクシャクしており、また δ_{dc} も図2.20の場合ほど小さくなく、値も安定していない。図2.20では $\delta_{dc} \approx 0.05 \text{ mm}$ であり、仮想小型試験片破断歪 $\epsilon_{ib} = 0.05 / 0.01 \sim 0.05 / 0.004 = 5 \sim 12.5$ となり、ほぼ

表 2.4 複合固体推進薬における裂開口変位の理論値と測定値の比較

薬種	BP-17	RS-1105
破壊特性	CTPB	CTPB
粘結剤		
充填粒子径	AP大粒 300 μ m AP小粒 10 μ m Al 25 μ m	AP } 微粒 10 μ m以下 PP } Al 25 μ m
仮想小型試験片 平行部の長さ l_{gi} (充填粒子断面は正八角形とする。)	AP大粒に対して $l_{gi} = 0.14$ mm	Al に対して $l_{gi} = 0.01$ mm AP } 微粒に対して $l_{gi} = 0.004$ mm PP }
限界裂開口変位 δ_c	$T = -50^\circ\text{C}$, $S.R. = 0.15/\text{min}$ $\delta_c = 0.8$ mm	$T = -50^\circ\text{C}$, $S.R. = 0.15/\text{min}$ $\delta_c = 0.2$ mm
仮想小型試験片の破断歪 $\epsilon_{ib} = \frac{\delta_c}{l_{gi}}$	$\epsilon_{ib} = \frac{0.8}{0.14} = 5.7$	$\epsilon_{bi} = \frac{0.2}{0.01} \sim \frac{0.2}{0.004} = 20 \sim 50$ $\epsilon_{bi} = \frac{0.3}{0.01} \sim \frac{0.3}{0.004} = 30 \sim 75$
動的裂開口変位 δ_d	—	$\delta_d \approx 0.06$ mm $\delta_d = 0.05$ mm
仮想小型試験片の動的 破断歪 ϵ_{idb}	—	$\epsilon_{idb} = \frac{0.06}{0.01} \sim \frac{0.06}{0.004} = 6 \sim 15$ $\epsilon_{ib} = \frac{0.05}{0.01} \sim \frac{0.05}{0.004} = 5 \sim 13$
CTPB単体の破断歪 ^{3,2,13)} ϵ_b	$\epsilon_b \approx 6.0$	$\epsilon_b \approx 6.0$ $\epsilon_b \approx 8.0$

注. T : 温度, $S.R.$: 歪速度

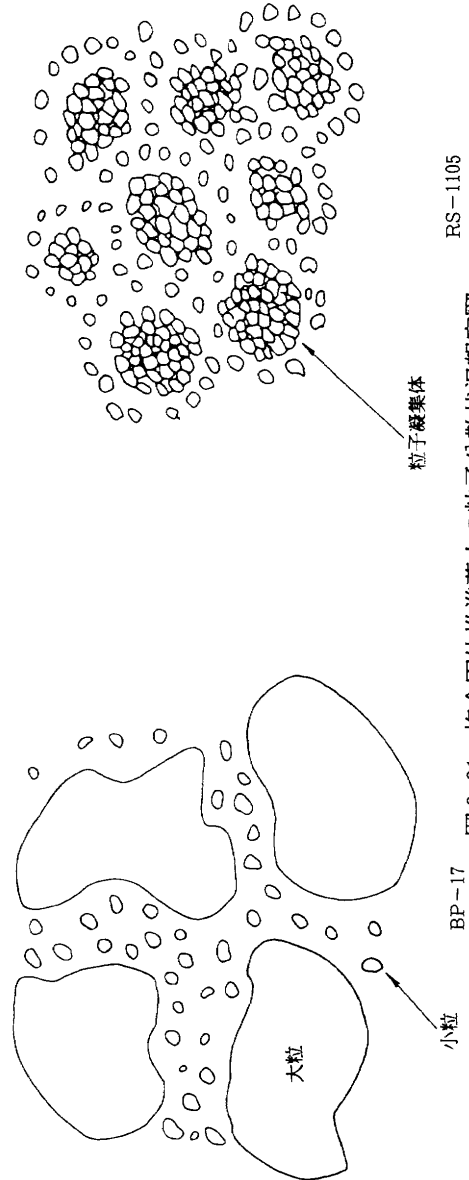


図 2.21 複合固体推進薬中の粒子分散状況想定図

BP-17

RS-1105

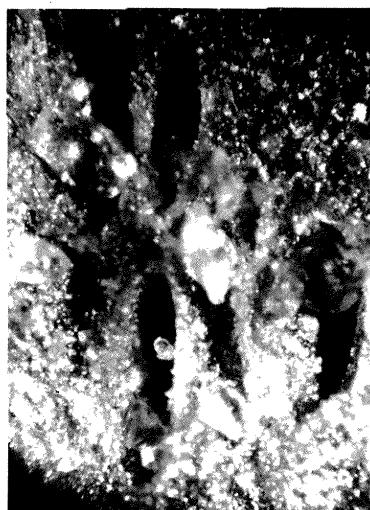
CTPBの ϵ_0 に一致する。従ってRS-1105の場合には、充填粒子の凝集体は、き裂発生に対しては大粒と同様の役割をはたすが、き裂伸展に対してはその温度・歪速度条件によっては大粒と同様の役割をはたさないと言えよう。この原因は、粘結剤の温度・歪速度依存性だけでなく、凝集体強度の温度・歪速度依存性にもよることが考えられる。すなわち、粒子の凝集体の粒子間には少量の粘結剤が存在しており、従って凝集体の強度には粘結剤のもつ温度・歪速度依存性が存在する（粒子自体の破壊は、粒子と粘結剤との接着強度が粒子強度に比し極めて小さいので、通常無視される）。また、この凝集体の周囲には粒子密度の相対的に小さい部分が存在し、従って条件によっては凝集体が大粒の役割を、その周辺の低粒子密度部分がBP-17における大粒間の小粒を含む粘結剤部分と同様の役割をはたすことになる。そしてBP-17では、き裂発生、伸展は、共に大粒の粒界破壊によるのに対し、RS-1105では図2.20の場合、き裂発生は凝集体を仮想大粒と見なしての粒界破壊、き裂伸展は仮想粒内破壊によると考えられる。もっとも、BP-17の大粒粒界の小粒を含んだ粘結剤の破壊に関しては、当然に粘結剤と小粒との剥離、き裂発生等を考慮する必要がある。しかし粘結剤は大粒を膜状に包んでおり、大粒剥離後、その一部より切断するが、未切断部では高分子の配向が極めて著しく、その破壊挙動は膜内部の小粒周辺を基点とするき裂伸展によるというよりも、膜内部の流動現象によるように観察された。くわしいことは、本観測機の観測能力をはるかに越える高い倍率、深い焦点深度を有する観測手段が必要となるが、本観測機によると、あたかも、『配向した高分子鎖のより合わさった網からなる網がよじれ、からみ合いながら伸張されており、伸展により切断した網が、からみ合いの中からズルズルと

引き抜かれて行き、そのため次第に、よじれからんだ網から成る粘結剤膜がやせ細って、ついには切断する。』というように観察された。この状況は図2.22、図2.23の連続写真にてもある程度、理解できよう。図2.22は、BP-17の大粒の周辺の剥離挙動の観察中に、偶然にもその大粒の直上部を、その大粒から発生したのではなく、はるかに離れた内部欠陥部（非人工的）から発生した主き裂が伝播する状況を幸運にも撮影したもので、粒子の引張方向両極の応力集中部^{2,14)}よりの粒子・粘結剤剥離、粘結剤切断等の複合固体推進薬の破壊過程をよく捕えたものと言えよう。

以上に述べたように、本観測機の観測能力はBP-17の大粒とその周辺については十分と言えるが、BP-17の小粒、微粒のみを含むRS-1105に対しては不足している。この意味で、本機の名称を「微細」観測機としている。今後はより高い倍率、より深い焦点深度を有する電子顕微鏡等を適用しての「微視」観測機の試作が期待される。また、複合固体推進薬のき裂発生・伸展に関しては、き裂（先端）開口理論（C(T)OD理論）を複合固体推進薬に適合するように発展させた結果、本観測機による測定値と「微細」な意味においてかなり良い一致を見た。従って固体ロケット・モータの信頼性評価基準の作成のためには、推進薬内に存在する欠陥、き裂に関するデータとして、き裂開口変位測定値は有用であろう。今後は粘結剤単体の試験片の破壊挙動に対応した仮想小型試験片模型から、小粒・微粒を含む仮想小型試験片模型へのき裂開口変位理論の「微視」的な方向への発展が「微視」観測機の開発と共に期待される。

2.5 まとめ

固体推進薬の破壊基準を確立するためには、その破壊



(1)



(2)



(3)

図2.22 推進薬微細観察写真A

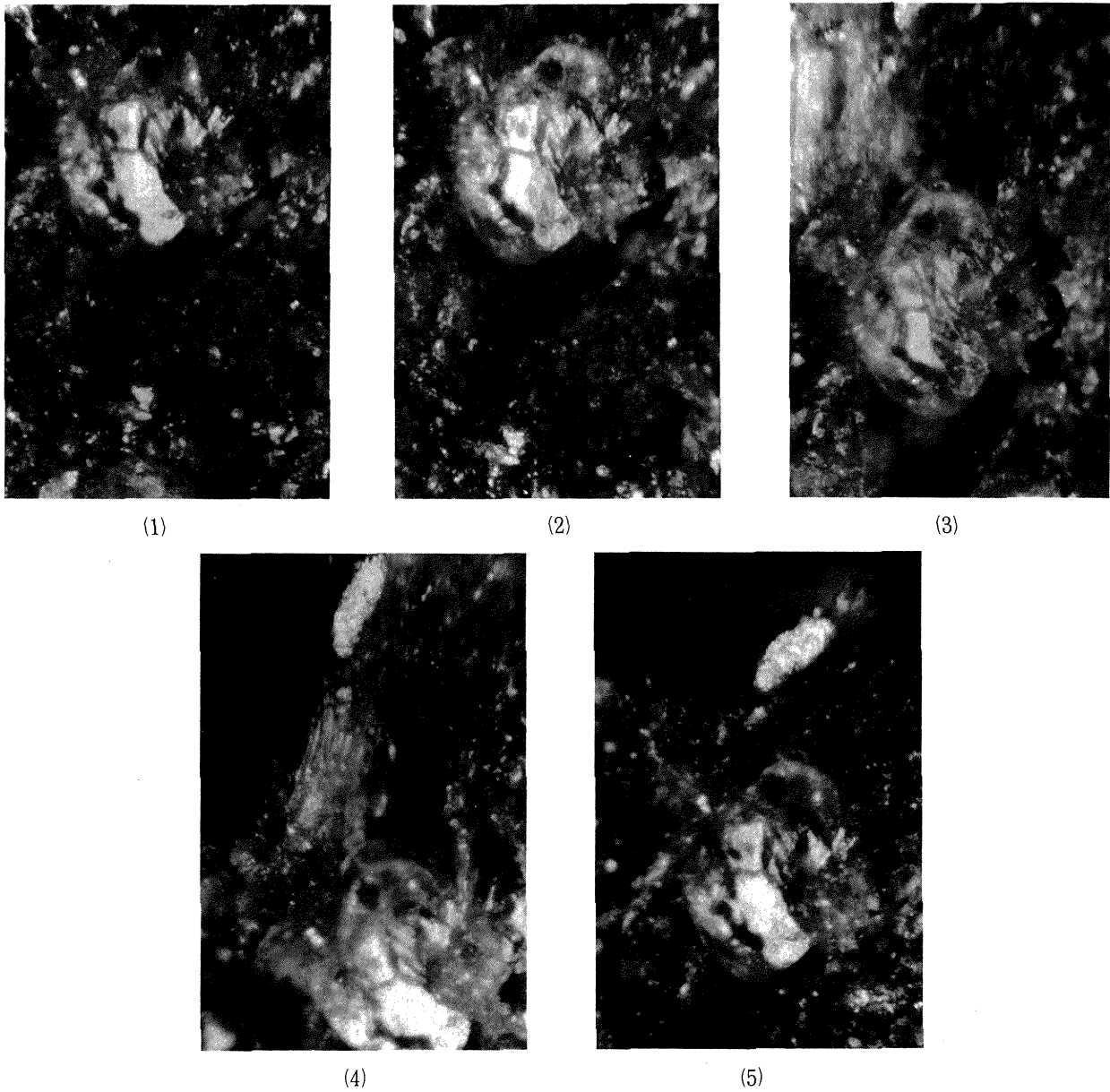


図 2.23 推進薬微細観察写真B

過程を観測する必要があるという観点に立って、複合固体推進薬の破壊過程を広範囲の温度、歪速度条件下で微細に観測し、その破壊特性を測定する目的で、小型引張試験機、恒温槽、光学顕微鏡を組合せた「固体推進薬破壊過程微細観測機」を試作し、それによる破壊過程の観測、破壊特性の測定を行なった結果、次のような結論が得られた。

- (1) 本観測機は、複合固体推進薬の破壊過程の観測にほぼ好適と言える。荷重容量の拡大、光学観測撮影の自動化（モーター・ドライブのムービー）は極めて効果的である。今後は温度制御の自動化が望まれる。
- (2) 複合固体推進薬の破壊特性として、円孔切欠周辺の変形・破壊挙動、鋭い切欠、先端のき裂開口変位と、き裂発生・伸展との関係が本観測機により

かなり明らかとなり、固体ロケット・モータの推進薬内の欠陥に対する許容基準作成に資するデータが得られた。

- (3) 複合固体推進薬の充填粒子のうち、大粒周辺については、本観測機はほぼ満足すべき性能を有しているが、小粒・微粒周辺等の微視的観測のためには、倍率・焦点深度が不足する。今後は、より高倍率で、深い焦点深度をもつ観測系、例えば電子顕微鏡等の適用が期待されると共に、き裂開口変位理論における仮想小型試験片模型内に微視的欠陥を含みうるような発展が望まれる。

2.6 参考文献

- 2.1) J. E. Fitzgerald, W. L. Hufferd; Handbook for the Engineering. structural Analysis of Solid

- Pro-pellants, CPIA Publication 214, UTECCE 71-089,
- 2.2) J. H. Wiegand; Recent Advances in Mechanical Properties Evaluation of Solid Propellants, ARS Journal, April 1962, pp. 521-527.
- 2.3) K.W. Bills Jr., J.H. Wiegand; Relation of Mechanical Properties to Solid Rocket Motor Failure, AIAA Journal, Vol.1, No.9, Sept. 1963, pp. 2116-2123.
- 2.4) 河田幸三, 井田峯人, 本堂明; 推薬の破壊過程の微視的研究, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第5巻, 第4号, pp. 521~532.
- 2.5) T. Godai, M. Shimizu; Pressure Exponent of Controllable Solid Rocket Propellants, AIAA Paper 72-1135, AIAA/SAE 8th Joint Propulsion Specialist Conference, New Orleans, 1972.
- 2.6) J. Okada; A Specimen Freezer for use in Microscopy, Proc. 2nd International Cryogenic Engineering Conference, 7-10 May 1968, pp. 310-312.
- 2.7) T. Kunio, M. Takashi, H. Fukase, T. Nagaoka, K. Shirota; A Study on Defect and Strength of Viscoelastic Materials, Proc. 9th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, Japan, 1971, pp. 211-216.
- 2.8) E.C. Francis, C.H. Carlton, G.H. Lindsey; Viscoelastic Fracture of Solid Propellants in Pressurization Loading Conditions, AIAA Paper 74-30, AIAA 12th Aerospace Sciences Meeting, Washington, D. C./January 30 - February 1, 1974.
- 2.9) M. Shimizu, T. Tanemura; Effects of Defects on Strength of a Composite Solid Propellant, Proc. 10th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, Japan, 1973, pp. 217-224.
- 2.10) M. Shimizu, T. Tanemura; Fracture Energy of a Composite Solid Propellant; Proc. 1974 Symposium on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, August 21~24, 1974, The Society of Material Science, Japan pp. 589-598.
- 2.11) T. Yokobori; Strength, Fracture and Fatigue of Materials, Noordhoff, Groningen, The Netherlands, (1965), T. Yokobori; An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids, Wolters-Noordhoff, Groningen, (1968), また日本材料強度学会誌, Reports of

the Research Institute for Strength and Fracture of Materials, Tohoku University, Sendai, Japan に多くの関連文献が掲載されている。

- 2.12) A.S. Tetelman, A.J. McEvily, Jr.; Fracture of Structural Materials, John Wiley & Sons, Inc. New York • London • Sydney, 1967, p. 60.
- 2.13) T. Kunio, M. Takashi, Z. Ueno, K. Hara; Effects of Ammonium Perchlorate Filler Fraction of Relaxation Modulus and Failure Mechanisms of Composite Propellant, Proc. 8th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, Japan, 1969, pp. 153~164.
- 2.14) S. Endo, K. Kawata; On the Failure Criteria of an Elastic Body with an Elastic Spherical Inclusion, Proc. 1975 Joint JSME-ASME Applied Mechanics Western Conference, Honolulu, Hawaii, USA, March 24~27, 1975, 75-AM, JSME A-22, The Japan Society of Mechanical Engineers, pp. 35-42.

第3章 チムニー型ストランド燃焼速度測定装置とTV観測法

3.1 まえがき

固体ロケット・プロペラントの燃焼速度とは、燃焼面が面と直角方向に進行する速度のことであり、プロペラント燃焼特性の中で最も基本的なものの一つである。燃焼速度は、プロペラント組成、燃焼圧力、および、プロペラント温度に依存する。

燃焼速度測定法は、棒状試験片を用いた、いわゆる、ストランド法と、小型ロケット・モータ法に大別される。ストランド法では、棒状に成形したプロペラントの周辺を燃焼しないようにレストリクタ処理し、それを一定圧力に保った圧力容器内で端面から燃焼させる。その圧力で一義的に定まる燃焼速度を測定するためには各種の方法が用いられている。最も一般的な方法は既知の間隔をへだててプロペラント試験片を貫通するヒューズ線が、燃焼面の通過にともなって次々と溶断する時間差からヒューズ線間の平均燃焼速度を求める方法である。

ストランド法では試験片が小さく、手軽に試験でき、多数のデータをとることが容易である。欠点は、試験片が小さいために燃焼面、火炎からの熱損失が大きく、燃焼速度の絶対値がロケット・モータでの値と差異を生ずることと、測定精度があまり高くないことである。このため、燃焼機構の研究、あるいは、プロペラント組成のスクリーニングなどの開発初期に用いられることが多い。小型ロケット・モータを用いて燃焼速度を求める方法

は測定精度が高く、また、試験モータの大きさによっては、大型モータの燃焼速度を十分な精度で推定することもできる。しかしその反面、小さくともロケット・モータであるために、製作、試験、データ処理に経費、時間がかかるのが欠点となっている。

このように、燃焼速度に対してプロペラント試験片の寸法効果があることが知られており^{3.1)}、ストランド法に比べるとモータ試験の場合に燃焼速度が高く、特に低圧領域において燃焼速度の増加率が大きく、その結果として圧力指数が低下し、また、モータ形状、大きさによっても燃焼速度に差異を生じる。

ストランド試験にも各種の方法がある。加圧方法では二つに大別され、一つはCrawford Bombと呼ばれるものである。窒素ガスを充填した加圧容器内でプロペラント試験片を燃焼させ、燃焼にともなう圧力上昇分だけ排出弁からガスを放出して一定圧力を保つ方法で、従来広く使われている。Summerfieldの考案したチムニー型ストランド法^{3.2)}では、定常的に窒素ガスを流して容器内を一定圧力に保ち、この中でプロペラント試験片を燃焼させる。Crawford式に比べて、プロペラント試験片の周辺を窒素ガスが流れ、燃焼ガス自体によって試験片が加熱されることも少ないため、燃焼速度のばらつきが小さく、また、燃焼面と火炎の光学観察も容易である。このように、ストランド法においては、一般に窒素ガスを雰囲気として用いているが、雰囲気種類は燃焼速度へ殆ど影響しないことが知られている^{3.1)}。すなわち、窒素、水素、および、熱伝導率が窒素ガスに比較して6倍も大きいヘリウム・ガス中においても、燃焼速度の差は殆ど見られない。なお、静止窒素ガス中と、流れている窒素ガス中では、後者の場合の燃焼速度が若干低いことが明らかになっている。

燃焼速度の測定法にも幾つかの方式が用いられている。先に記したヒューズ線法は最も一般的な方法であるが、その他に研究的には各種の方法が考えられた。例えばヒューズ法の変形として、ヒューズ線の代わりに、ある間隔をもってセットされた光センサを用いて、その間の平均燃焼速度を求める方法もあるが、すすによる汚れ等によって動作が不確実なことが欠点である。燃焼面を光学的に検知して、サーボ機構により試験片を移動して燃焼面を同一位置に保持し、サーボ入力から燃焼速度を求める方法がある^{3.3)}。燃焼機構の研究には便利ではあるが、すすによる光学系の汚染、複雑な装置のため燃焼速度の測定には用いられていない。

燃焼面の移動を映画撮影して燃焼速度を求める方法、あるいは、流しカメラ撮影によって得られる燃焼面画像位置変化から燃焼速度を求める方法もあるが、時間と経費がかかるのが欠点である。テレビ・カメラとビデオ・

レコーダを使用することによりこの欠点は除外できるので、この方法は燃焼面の観察と燃焼速度の測定に対して今後一層有効な利用が図られよう。

試験片の未燃部分から燃焼面へ向ってマイクロ波を放射して、その反射から燃焼面の移動状況を知ることでもできる。燃焼中断過渡期における燃焼速度の変化のような極めて速い変動を測定できるが、準定常的な燃焼速度を測定するには複雑すぎる。

プロペラントの状態によってもストランド試験法は二つに大別される。一般には硬化した固体プロペラントを試験に供するが、製造中における簡便な燃焼速度のチェック法として、ストロー内に流しこんだプロペラント・スラリーを硬化させずにそのままの状態を試験することもある。

本研究の目的は、チムニー型ストランド燃焼試験装置による固体プロペラントの燃焼速度の測定に際して、その測定精度を向上させるための最適な装置の使用法、試験片の形状状態、および、試験条件を求めることにある。このために、窒素ガスとプロペラントの温度変化、窒素ガス流量、試験片の最適形状と周辺レストリクタ処理、着火法を実験的に調べた。また、熱容量が小さいため一定温度に保持しにくい試験片の保温方法も試みた。

3.2 試験装置と供試体

試験装置のブロック図を図3.1に示す。クロフォード・ボンベと大きく異なる点は、窒素ガスがチャンバ内を加圧しつつ流れていることである。チャンバ周辺機器であるチャンバ圧力測定系、および、ヒューズ溶断時間差測定系は従来方式と同一である。図3.2は窒素ガス供給系を示しており、チャンバ内の窒素ガス圧力と流量を調整するための調圧弁、オリフィスと配管、圧力計等より構成されている。図3.3、図3.4は、それぞれ、窓付きチャンバの断面および外観を示す。チャンバは厚肉のステンレス鋼製であり、内径54mm、内孔長さ104mm、であ

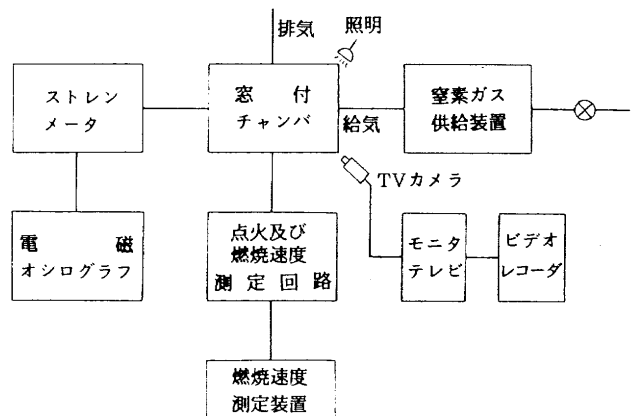


図3.1 試験装置ブロック図

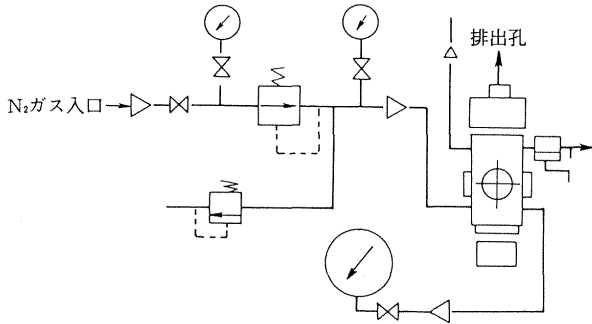


図3.2 窒素ガス供給系

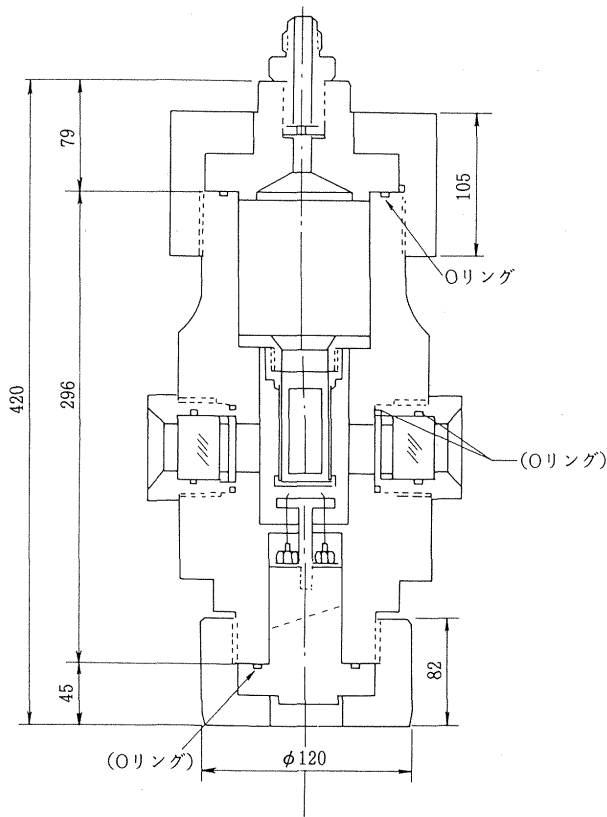


図3.3 窓付チャンバー

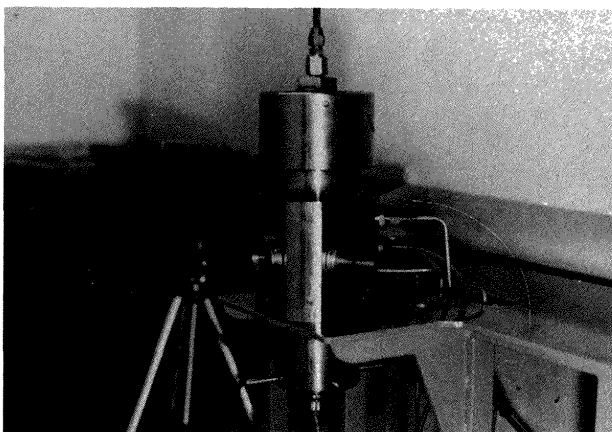


図3.4 窓付チャンバー外観

る。窒素ガスはプロペラント・ホルダの下部から供給され、垂直にセットされているプロペラント試験片に沿って上向きに流れた後、燃焼ガスと共にオリフィスを通して排出される。チャンバの常用圧力は10MPa、耐圧は15MPaである。チャンバには石英ガラス製覗き窓が2ヶ所設けられており、照明および光学観測に使用される。

プロペラント試験片まわりには、チムニーと称する外筒が取り付けられており、このため、窒素ガスは燃焼ガスと混合することなくプロペラント側面沿いに上向きに一定速度で流れる。プロペラント燃焼面の光学観測を行なう際には、ガラス製チムニーを用いる。燃焼ガス流量に対して窒素ガス流量が少ない場合には、燃焼ガスがチャンバ内を下へも流れ、その煙により燃焼面の光学観測が不可能となるので、ある流量以上の窒素ガスを流す必要がある。光学観測が必要でない場合には、ガラス製に代えて金属製のチムニーを取り付けて反復使用に供する。図3.5は試験装置全体の外観を示す。板ガラス製チムニーの内側にセットされたプロペラント試験片はプロペラント・ホルダに固定されており、この実験準備の完了した状態でチャンバの下部から装填・固定される。図3.6は板ガラス製チムニーと、ホルダに取り付けられたプロペラント試験片の状況を示す。

表3.1に試験に用いた固体プロペラントの組成、物理・燃焼・強度特性を示す。AKMプロペラント (BP-101J) は、アポジ・モータ用に開発されているもので、HTPBバインダの重量比は11%と低く、比推力の高いことが特徴である。RSプロペラントは、固体ロケットの推力中断・再着火用に開発されたプロペラントで、酸化剤に過

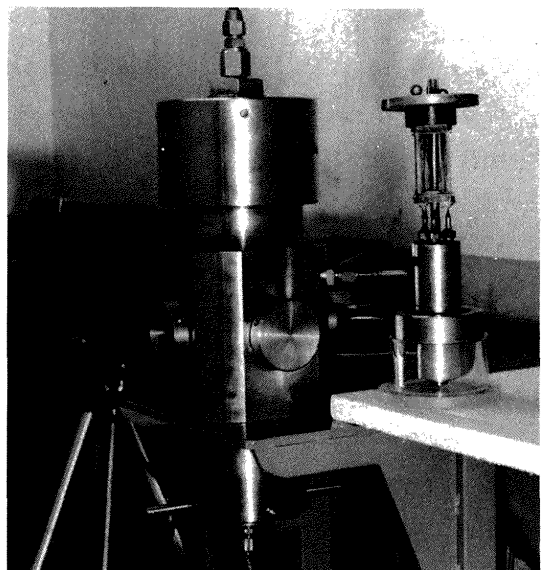


図3.5 試験装置の外観

左：ITV，中央：覗き窓付チャンバー

右：板ガラス製チムニー内にセットされた推進薬試験片

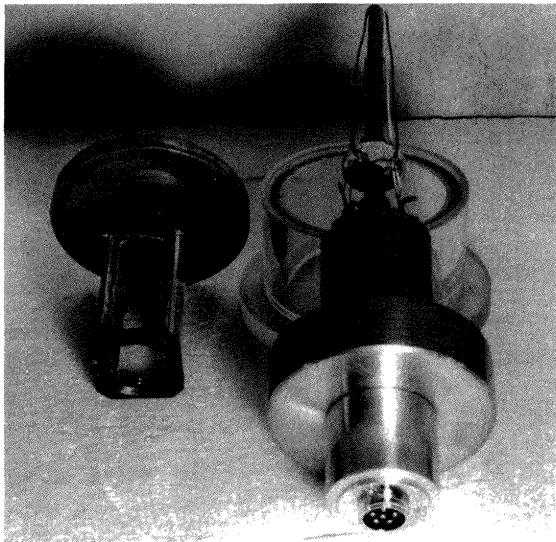


図3.6 ホルダに取付けられた推進薬試験片
 左: 板ガラス製チムニー

表3.1 国産アポジモータ用推進薬 BP-101Jの組成

名称	HTPB粘結剤	AP	Al
BP101J	11 wt %	73 wt %	16 wt %

塩素酸カリウムも含み圧力指数が高く燃焼中断し易い性質をもっている。プロペラント試験片は、一般に7mm角、長さ約80mmの角柱を用いた。プロペラントの燃焼速度測定のために、50mm間隔でプロペラントにあけられたφ0.5の2個の孔に、φ0.3の2本のヒューズ線を通させている。燃焼面がヒューズ線位置に達した際にヒューズが溶断し、2本のヒューズ間隔と溶断時間差から、その間の平均燃焼速度が求められるのは従来のストランド試験と同様である。

3.3 窒素ガスおよびプロペラントの温度変化

窒素ガスは市販ポンプを用いているが、窒素ガス供給系の調圧弁を通して元圧よりチャンバ設定圧まで降下させられるため、ジュール・トムソン効果によりチャンバ内に流れる窒素ガスの温度は、一般に、チャンバ内に取付・調温されたプロペラント試験片の温度とは異なってくる。プロペラントは温度により燃焼速度が変化するが、この変動を避けることが重要である。熱容量の小さなプロペラント試験片の温度は、チャンバ圧力の調整中にこの窒素ガス流の影響を受け変化するおそれがある。

チムニー型試験装置におけるこの温度変化の状況を調べるために図3.7に示す温度測定用プロペラント試験片を用いた。温度測定用熱電対はクロメル・アルメルで太さφ0.1である。3本の熱電対の内、 T_1 はプロペラントの中心に埋めこまれている。 T_2 はプロペラント表面に

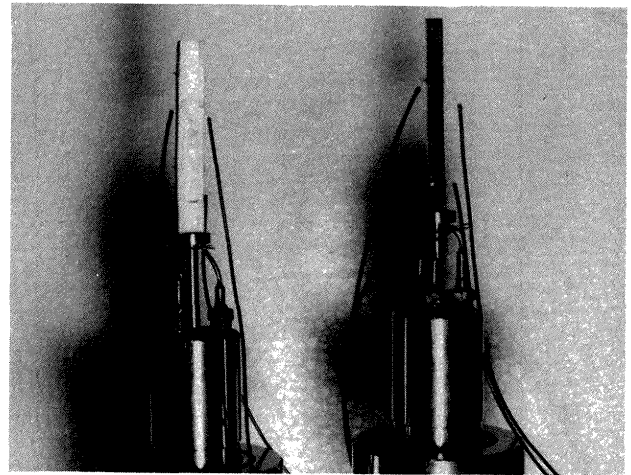


図3.7 温度測定用推進薬試験片
 (右) 断熱カバー無し
 (左) 断熱カバー付き

接着され、 T_3 は窒素ガス雰囲気温度測定用である。なお、加圧用窒素ガスボンベ温度 T_B (貯蔵されている場所の気温)と、試験装置の室温 T_R は水銀温度計により測定した。プロペラント試験片は試験装置内の中央付近に保持されているため、室温 T_R がプロペラント試験片の初期温度とみなすことができる。

この窒素ガスおよび試験片の温度測定実験のパラメータとしては、チャンバ定常圧力、定常圧力に達するまでの圧力上昇速度(調圧速度)、および、窒素ガス流量(チャンバのオリフィス径に依存)の三つであり、これらの設定値を変化させた場合の T_1 、 T_2 、 T_3 の時間変化を求めた。チャンバ定常圧力は1MPaから5MPaまで1MPaおきの5段階である。調圧速度としては二通りを実験した。「速い」場合と「遅い」場合であり、速い場合とは、元弁を急速に開けて調圧速度は調圧弁特性に依存する場合であり、オリフィス径、定常圧力値によるが約1秒で定常圧力に達する。一方、調圧速度の遅い場合とは、手動で元弁を徐々に開けることにより調整するので再現性は悪いが、この場合、チャンバ圧力が0から定常値に達する時間は10秒のオーダーである。図3.8に上記各種条件での N_2 ガス流量を示す。

温度測定結果の例を図3.9に示す。本実験においては、 N_2 ガスボンベ温度を正確に一定とできず、約5°Cの範囲にまたがっている。この影響が大きく、オリフィス径やチャンバ定常圧力等の差異の効果は明確には現れていない。 N_2 ガスボンベや配管の温度を正確に制御することは困難であり、また図3.8の温度データのバラツキも2~3°C程度なので、 N_2 ガス温度の制御は試みなかった。

その代り、ストランド表面を発泡材等の保温材料で、熱的に保護する方法を試みた。図3.7の左に示すように、ポリウレタン発泡材(1~3mm厚)を四角柱ストラン

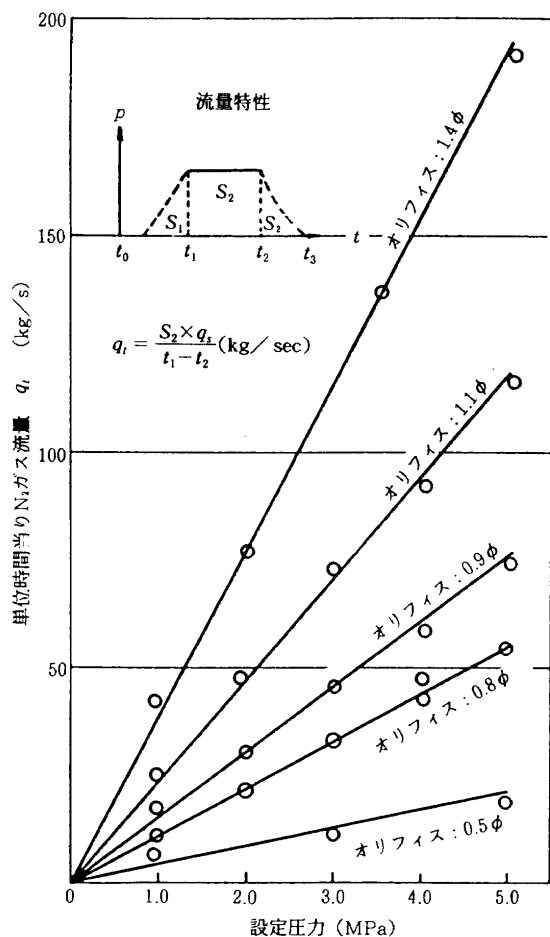


図3.8 チャンバ設定圧力，オリフィス径の N₂ ガス流量に及ぼす効果

ドに接着した。これを恒温槽内にて低温（約-15℃）と高温（約55℃）とに保ったのち，ストランド燃焼試験装置に装着して放置した時の温度変化を図3.10に示す。低温試験の場合断熱カバーのない場合には10分後にはほぼ定常状態に達しているが，それ以外では20分後でも定常状態に達しておらず，断熱効果が認められる。

断熱カバーの厚さによる差異は初期の温度差の大きい場合は顕著であるが，15分後の時点ではあまり大きくない。従って環境温度の差異が小さく，チャンバ内圧の調圧のように短時間である場合には，断熱カバーの厚さは1mmでも十分であろう。

3.4 ストランド燃焼試験

供試推進薬はBP-101Jで，φ7とφ10のストランド試験片を用意した。レストリクタはエポキシ系の短時間硬化接着剤を用いたものが良く，レストリクタを付さないものや，表面の水洗による酸化剤粒子の洗い出し方式は，表面の火炎伝播発生の有無によるデータのバラツキが大きく，良好なデータは得られなかった。

着火方式はストランド端面にφ0.3のニクロム線（長さ7~10mm）を接触させ，20Vの交流電圧を印加する

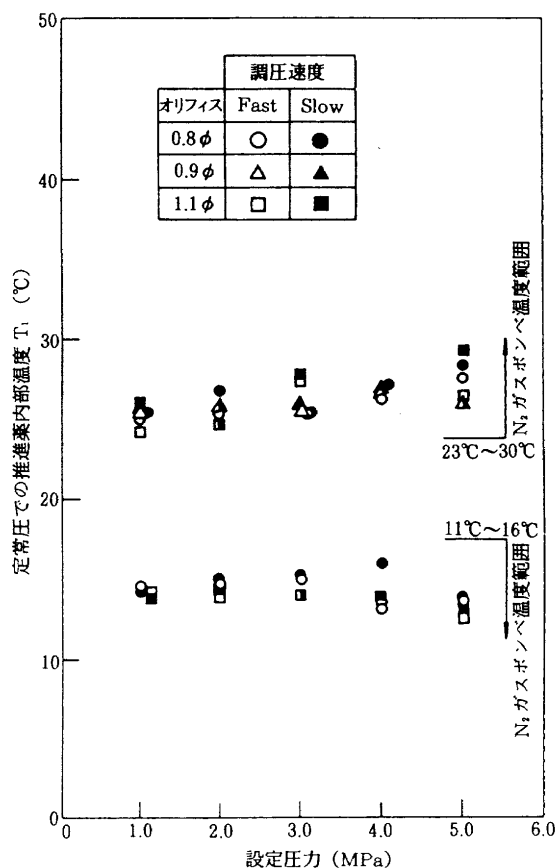


図3.9(a) 調圧用オリフィス径の違いによる推進薬内部温度の比較

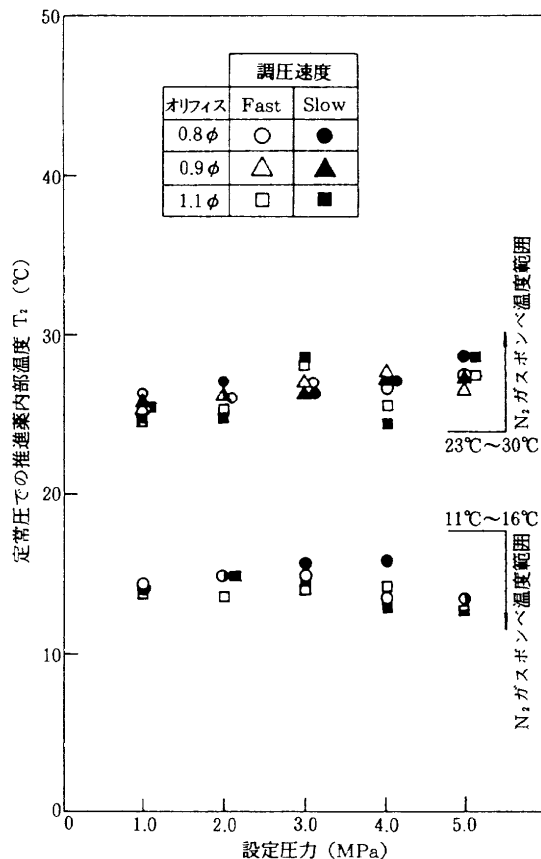
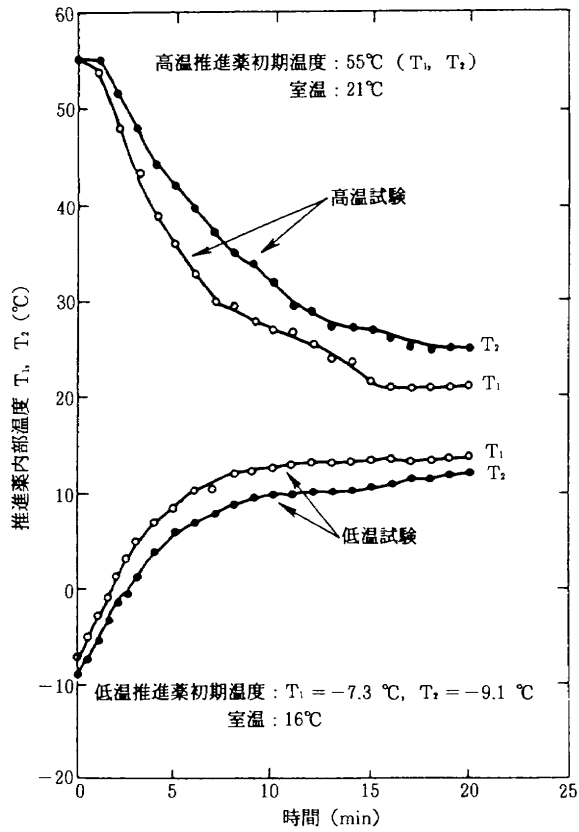
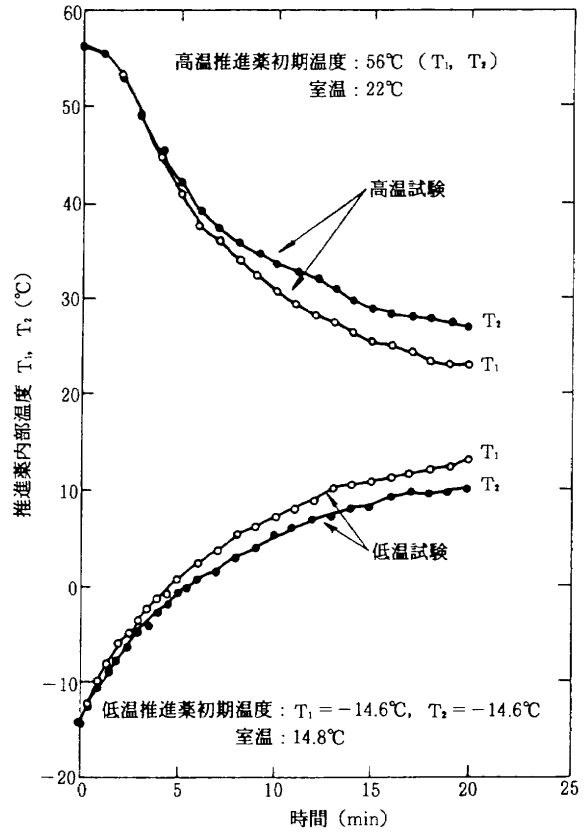


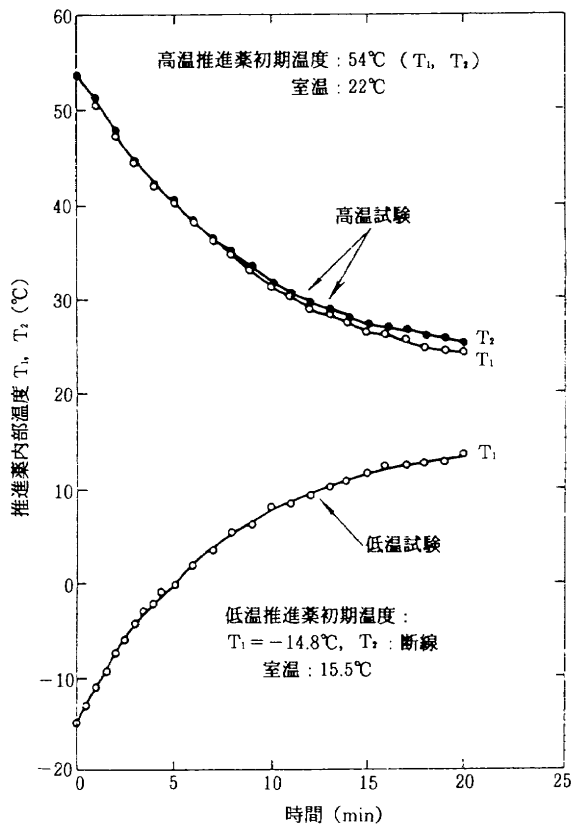
図3.9(b) 調圧用オリフィス径の違いによる推進薬内部温度の比較



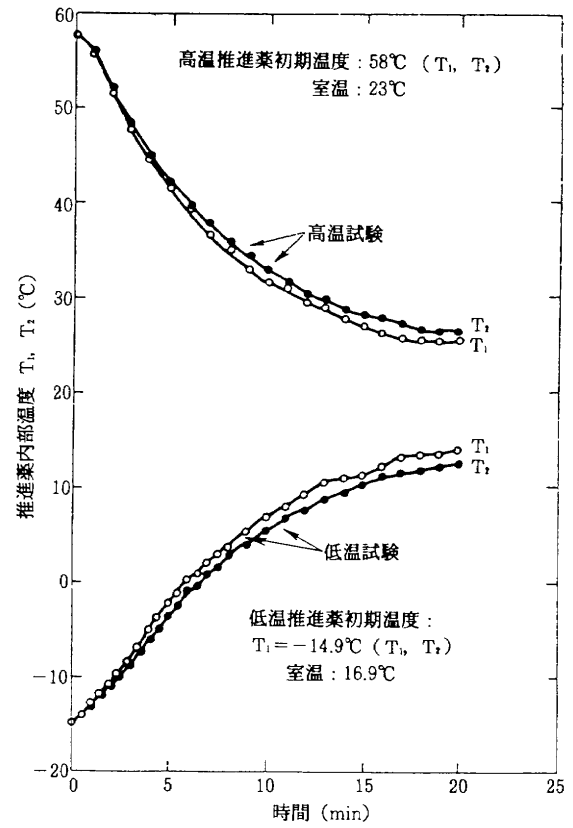
(a) 断熱カバーなし



(b) 断熱カバー 1 mm厚さ



(c) 断熱カバー 2 mm厚さ



(d) 断熱カバー 3 mm厚さ

図3.10 推進薬内部温度の変化

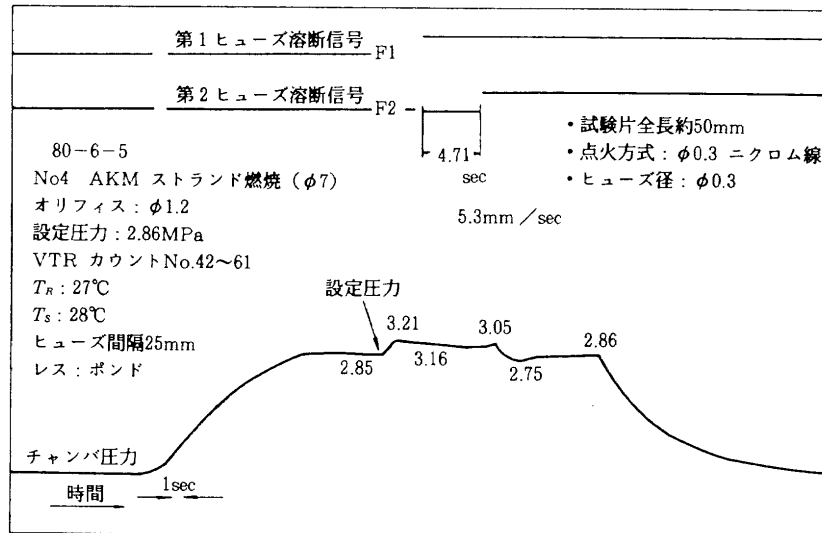


図 3.11 ストランド燃焼試験における圧力・時間曲線の例

方式とした。この方法により極めて安定確実な着火が可能となった。

図 3.11 にストランド燃焼実験における圧力・時間曲線の例を示す。チャンバ圧力は10秒程で設定値に達するが、十分に定常状態に達したことを確認した後（約5秒後）ストランドに着火する。ストランドの燃焼によりチャンバ圧力は約10%上昇して一定となり、この圧力での燃焼速度が測定される。図上部にヒューズ溶断信号が記録されており、この時間から燃焼速度が算出されることになる。

3.5 TV 装置の導入

ヒューズ溶断方式の計測方法は、精度も必ずしも十分ではないし、何よりも手数、時間を要し、能率が悪い。その上、ストランドに異常燃焼があっても感知できない。従って、異常なデータが出た場合にその処理が困難となる。

本装置では、燃焼状況のモニタリングの必要性を認める立場から、TV 装置によるモニタリングを導入した。第一段階では、単に異常燃焼の有無を確認するだけであったが、第二段階では、ヒューズ溶断方式をやめ、TV による計測方法とした。ここでは、ストランドの照明方法の工夫、ストランドに付す標線をTV計測に最適なものにする工夫がなされた。その結果、光学顕微鏡用ハロゲン照明装置の導入、ストランド表面に1mm厚の亚克力板を接着し、その亚克力板にあらかじめ多数本の標線を刻印しておく方式を採用し、極めて良好な結果を得た。また、ストランド燃焼ガスによる光学観測の困難さについては、 N_2 ガス流量の調整、光学窓とストランドとの間隔を狭める亚克力厚板の設置により、煙の中の光路を短縮する方法が有効であった。

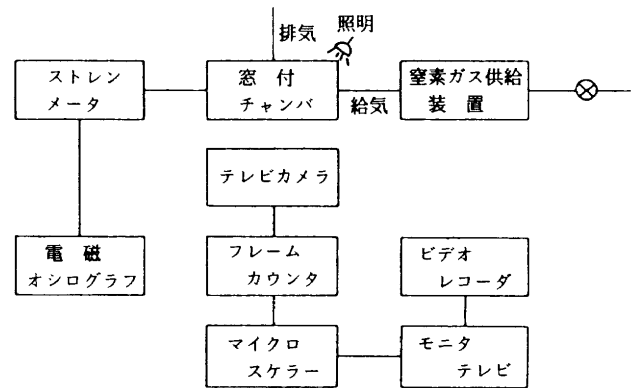


図 3.12 テレビ画像処理装置を用いた試験装置ブロック図

良好な光学像が得られたので、後はいかに効率よく正確に測定するかが問題となる。ここでは図 3.12 に示すように、TV 画像の処理装置を導入した。TV フレーム・カウンタにより、標線を火炎が通過する時間をTV 画像のフレーム枚数から簡単に測定できる。次には、ストランドに標線を付すことも省略するために、TV 画像上の任意の位置に白線を描くことのできるマイクロスケラー装置を導入し、標線に相当する位置にあらかじめ白線を描き、ストランド燃焼試験の状態をビデオに録画することにした。その後で白線を通する時点をフレーム枚数から、 $1/30$ 秒の精度で測定する。この方式の時間計測精度 $1/30$ 秒は実験結果のバラツキよりはるかに小さい。実験時の情報も最大限ビデオに記録される。

以上のように、ストランド燃焼速度の計測にTV装置を導入することは計測精度、燃焼状況のモニタ、実験準備およびデータ処理の能率等、ほとんどすべての面で極めて良好な結果をもたらした。今後はこの方式が、国産固体推進薬製造部門にも導入されることが望ましい。

3.6 まとめ

- (1) チムニー型ストランド燃焼速度測定装置を試作し、H-I・上段モータ用推進薬にてその性能が十分であることが確認された。
- (2) 推進薬の温度に及ぼす窒素ガスの影響を調べ、その対策としての推進薬保温法が有効であることを確認した。
- (3) 燃焼速度測定に、ヒューズ溶断方式よりTV観測方式が、異常燃焼の有無の確認、測定時間短縮、データ処理の能率化にはるかに有利であり、測定精度も高いことから、今後はこの方式が推進薬製造部門にも導入されることが望ましい。

3.7 参考文献

- 3.1) 五代富文, 外; 推力中断型固体ロケット用プロペラントの圧力指数への寸法効果, 航技研報告, NAL・TR-537, 197年7月.
- 3.2) D. W. Blan, et al.; Some Research Problems in the Steady State Burning of Composite Solid Propellants, Solid Propellant Rocket Research: Progress in Astronautics and Rocketry, Vol. 1, pp. 183-206.
- 3.3) R. C. Deer, et al.; A Technique for Controlling the Position of a Burning Solid-Propellant Sample in a Combustion Bomb, J. of Spacecraft and Rockets, vol. 6, No. 10, Oct. 1969, pp. 1120-1124.

第4章 推進薬の変形時の燃焼速度

4.1 まえがき

固体推進薬の最重要特性の一つである燃焼速度の測定は、第3章にも述べたように最初はストランド燃焼試験によって測定されるが、最終的には寸法効果のあまりない小型モータ燃焼試験にて行なわれる。この場合、一般的には推進薬の変形は無視されている。ストランド燃焼試験では、通常ストランドには熱応力等はほとんど作用せず、変形は無視する。また小型モータにおいても、推進薬グレインはフリーな状態でモータ・ケース内に納められている場合が多く、直填式などを採用した場合にも、モータが小型のため、変形量はさほど大きくない。

一方、実機モータはかなりの大型であり、熱応力、自重等による変形はかなり大きくなる。さらに、モータ製造後、打上げまで数年間経過することもあり、その間のクリープ変形、疲労変形等は無視できなくなろう。疲労変形にともなう損傷の燃焼速度への影響については第5～7章に述べることにし、ここでは引張、クリープ等の変形損傷を受けた推進薬のストランド燃焼速度について

実験的に調べた結果について述べる。

4.2 試験方法

供試推進薬はH-Iアポジ・モータ用BP-101Jである。試験片は物懇型試験片およびその7/10縮尺の両方を用意したが、これはストランド燃焼試験には7/10縮尺の7×7角柱形状の方が10×10角柱形状より適しているためである。10×10角柱でもストランド燃焼試験は可能であるが、燃焼ガス量が多いため、チャンバ内圧の調圧がやや困難となり、また多量の煙のため光学観測にも不利となる。一般にストランド燃焼試験はφ7程度の試験片で行われており、物懇型試験片を7/10程度縮尺しても、物性・強度にほとんど寸法効果は表われないことから、7/10縮尺試験片の採用を検討した。航技研で固体推進薬破壊過程微細観測器を試作した際、3/10縮尺試験片を採用したが、この場合には試験片断面積は1/10となり、その中に含まれる充填粒子数の減少効果、粘結剤と充填粒子との剥離域の相対的增加のため、静引張試験における応力-伸び曲線において、最大応力点まではほとんど差はない(但し、最大応力点を過ぎた後の伸びが半減している。)ことが認められている。一方、日産自動車(株)の社内試験では5/10縮尺試験片においてほとんど寸法効果のないことが確認されていた^{4.1)}。これらのことから、7/10縮尺試験片の採用を決定した。

これらの試験片を引張試験機にかけて引張変形させた。使用した試験機は東洋測器(株)のTOM-200Bである。これらの試験片の破断伸び l_b は7/10縮尺試験片で約15mm、10/10試験片で約20mm(破断ひずみ $\epsilon_b=28\%$)以下であり、ブースター用等の一般的な推進薬に比して半分以下となっている。従って、あまり大きな伸び変形を破断させずに与えることは困難であるので、ここでは、伸びとして10mmを与えることにした。

伸び変形を与えた後、三種類の方法を使った。①除荷すると短時間のうちに変形はなくなり元の形状にもどる。そこでレストリクタを付す。②負荷中にエポキシ系の接着剤によるレストリクタを付す。この場合、接着剤の硬化後に除荷すると、除々に変形は減少し、24時間後には変形はほとんどなくなっていた。③負荷中に厚さ1mmの亚克力板を試験片の表裏に接着する(片側だけ亚克力板を接着すると、試験片・亚克力板複合体は、推進薬の収縮により曲る)。接着剤が十分硬化した24時間後には試験片は数時間の間亚克力板に収縮をさまたげられて、伸び変形状態を保持する。その後は、応力条件のきびしい両端部より徐々に推進薬・亚克力板間が剥離する。そこで、この数時間の間にストランド燃焼試験を実施することにした。また、固体推進薬用に開発したクリープ試験機により、0.1MPaの応力にて6～

24時間、および0.2MPaにて6時間のクリープ変形を与え、その後荷重を半減して変形をほぼ一定に保ち、アクリル板を試験片の表裏に接着した。この場合にも変形は数時間の間、アクリル板も剥離せずに保持されるので、この間にストランド試験を実施した。

4.3 実験結果

7/10縮尺試験片(7×7AKM)についての結果を図4.1に示す。燃焼速度の測定のための標線は変形後に付した。アクリル板にて固定したストランドについては、燃焼試験までに時間がかかりすぎたため、推進薬・アクリル板間に多少の剥離が発生していた。そのため火炎が推進薬アクリル板間に入り、見掛上燃焼速度が大きくなっているが、その他そのデータはほぼ一定となり、変形損傷の燃焼速度への影響は小さいことがわかる。次に、変形自体の燃焼速度への影響を調べるために、10/10物懇型試験片にて、同様の引張変形およびクリープ変形を与えての燃焼速度測定を行った。その結果を図4.2に示す。燃焼速度は図4.1に比して大きい、これはバインダが異なる等のためである。この場合には、燃焼速度の算出は変形前(白抜きデータの点)と変形後(塗りつぶしのデータ点)での標線間距離にて行った。このような2種の観測法はそれぞれ数学的に区別されており、変形前の座標による観測法をラグランジェ法、変形後の座標による観測法をオイラー法という。図4.2はデータ点の種類が複雑でわかりにくい面もあるので、これらのデータを図4.3にて、ラグランジェ法とオイラー法によるデータに分類して、それらのデータの存在する領域を示した。これからわかるように、オイラー法によるデー

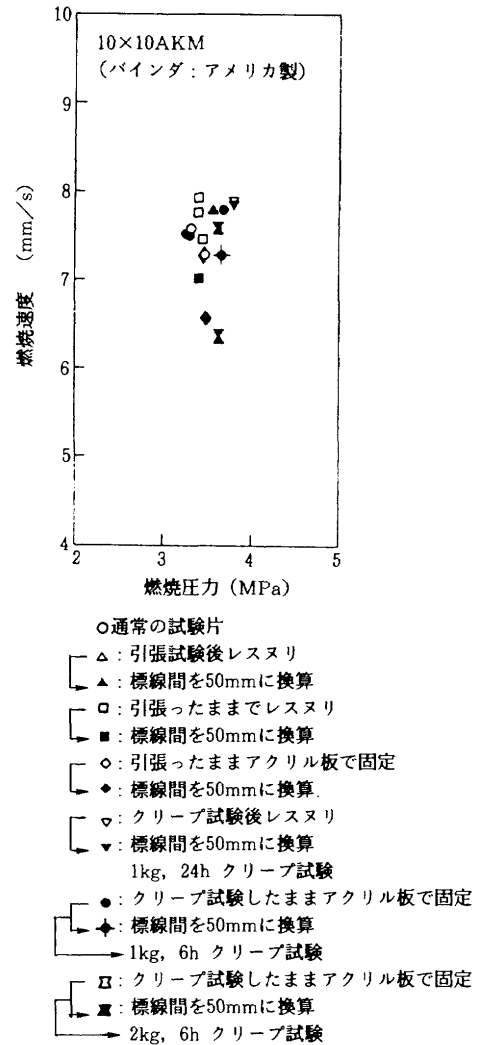


図4.2 物懇型試験片における静引張、クリープ変形の燃焼速度に及ぼす影響

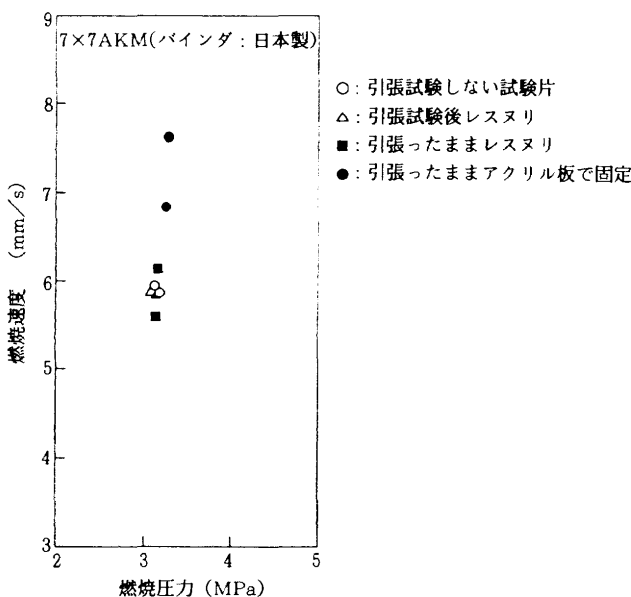


図4.1 7/10縮尺試験片における変形の燃焼速度に及ぼす影響

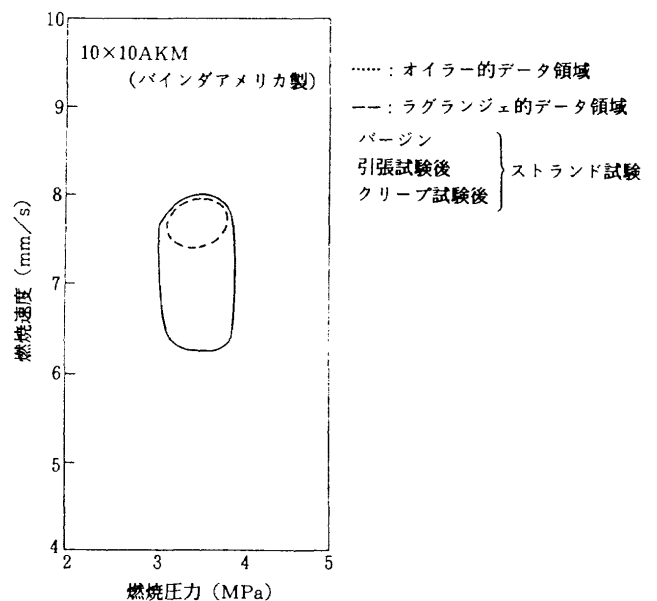


図4.3 ラグランジェ法とオイラー法による変形ストランド燃焼速度測定

表 4.1 変形の有無・種類による燃焼速度の変化

試験片 断面 (mm)	燃 焼 圧力 (MPa)	標 線 間 距離 (mm)	標線間燃焼 時間 (s)	オイラー法 による燃焼 速度 (mm/s)	ラグランジュ法 による燃焼 速度 (mm/s)	備 考
7×7	3.14	33.1	5.62	5.89	—	通常試験片
”	3.11	28.5	4.80	5.94	—	”
”	3.09	30.0	5.06	5.93	—	引張試験後レス塗り
”	3.11	31.1	5.31	5.86	—	”
”	3.14	32.1	5.69	5.64	—	引張ったままレス塗り
”	3.16	31.5	5.14	6.13	—	”
”	3.25	41.2	6.02	6.84	—	引張ったままアクリル板で固定
”	3.27	41.8	5.48	7.63	—	”
10×10	3.33	45.2	5.97	7.57	—	通常試験片
”	3.30	44.9	5.99	7.50	—	”
”	3.29	45.4	6.04	7.52	—	”
”	3.55	49.8	6.48	7.69	—	引張試験後レス塗り
”	3.59	50.1	6.43	7.79	7.78	”
”	3.42	53.4	7.14	7.48	7.00	引張ったままレス塗り
”	3.50	55.7	7.60	7.33	6.58	引張ったままアクリル板で固定
”	3.42	50.9	6.43	7.92	7.78	引張ったままレス塗り
”	3.41	49.7	6.49	7.66	—	引張試験後レス塗り
”	3.24	49.1	6.57	7.47	—	”
”	3.75	50.4	6.39	7.89	7.82	24時間1kgでクリープ試験 試験後レス塗り
”	3.67	53.2	6.84	7.78	7.31	6時間1kgでクリープ試験 試験したままアクリル板で固定
”	3.65	59.7	7.82	7.63	6.39	6時間2kgでクリープ試験 試験したままアクリル板で固定

*7×7 試験片は日本製バインダ

*10×10 試験片は米国製バインダ

タ領域はラグランジュ法によるデータ領域よりはるかに小さく、かつ変形のないストランド試験データのバラツキ領域の大きさと同程度となっている。このことから、推進薬の燃焼速度は変形の有無にかかわらず、燃焼時(変形のある場合には変形後)の空間座標による測定(オイラー法)によって評価すべきことがわかる。なお、ここでの実験データを表4.1に示す。

4.4 考 察

以上の実験において、推進薬に変形を与えて燃焼速度を測定したのであるが、ここで2つの問題があることがわかった。

(1) 推進薬の物性・強度

供試推進薬はH-Iアポジ・モータ用高性能推進薬BP-101Jであり、HTPBバインダの採用によりバインダの配合比を11wt%にまで落して高性能化を図っている

が、バインダ量の減少は推進薬の物性・強度に悪影響を与えるのが一般的である。本実験においてはBP-101Jの最大荷重時の伸び $l_m=13\text{mm}$ (ϵ_m で19%)、破断伸び $l_b=17\text{mm}$ (ϵ_m で27%)、最大荷重 $\sigma_m \approx 1\text{MPa}$ (温度 $T=20^\circ\text{C}$ 、引張速度 $\gamma=50\text{mm}/\text{min}$ 、物懇型試験片)となっており、かなり硬く脆い推進薬と言えよう。これでは、推進薬の信頼性について問題となりうると考え、関係各方面に注意をうながし、検討した。その結果、バインダを12wt%と1%(バインダとしては1/11 \approx 9%)増加させたBP-105Jに変更することになった^{4.2)}。

(2) 燃焼速度測定法とグレイン・デザイン

燃焼速度の測定に際しては、その標線は変更後に付したものによるべきこと、つまりオイラー法によるべきことが明らかとなった。

このことは、実機モータにおいても重要な意味を有する。モータの推進薬のグレイン・デザインにおいては、

通常は製造時の推進薬形状がモータ燃焼時まで変化しないとしている。しかし、実機モータは製造後、数年間を経て使用されることも少くない。このモータ保存期間には、モータは熱応力、自重、運搬時等の振動、さらには発射時の大加速度、点火時の圧力ショック、燃焼時の内圧等の負荷を受け、変形する。もし、推進薬の燃焼速度が変形前の座標にて測定してよい(ラグランジュ法)のならば、これらの変形はモータ設計時に無視してよいことになる。しかし、上述の実験結果は変形後の座標(オイラー法)によるべきこと示しており、実機モータにおいては、製造後に変形が生ずると燃焼圧力カーブが変化することになる。従って、モータ設計時には、モータの製造後使用するまでの変形を考慮に入れたグレイン・デザインをすべきことになり、また、モータ使用直前に推進薬の変形状態を測定し、燃焼特性の評価の再確認を行う必要がある。

4.5 まとめ

H-I ロケットのアポジ・モータ用推進薬BP-101Jを使って、推進薬の引張、クリープによる変形損傷、変形自体の燃焼速度への影響をストランド燃焼試験法にて調べた。その結果、次の結論が得られた。

- (1) 推進薬を変形させても、負荷を除くと変形は減衰する。変形量が零に近づいた段階での変形による損傷の燃焼速度への影響が燃焼速度のバラツキの範囲内にあり、問題とならない。
- (2) 推進薬の変形自体の燃焼速度への影響は、標線を変形後に付するオイラー法により除去しうる。このことは、モータ設計時には、製造後の変形量を考慮しなければならないことを意味する。
- (3) 供試推進薬の物性・強度はバインダを減小させすぎたためか、かなり硬く、もろい。モータの信頼性確保の観点から問題を提起し、関係各方面と検討した結果、H-I ロケットのアポジ・モータ用推進薬はバインダ12W%のBP-105Jに変更された。

4.6 参考文献

- 4.1) 日産自動車(株)よりの私信。
- 4.2) NASDA-日産自動車(株)間技術連絡書624-F-56-113, 昭和56年8月13日付。

第5章 推進薬用疲労試験機の開発と統計的疲労強度

5.1 まえがき

複合固体推進薬の破壊については、固体ロケット・モータの設計・開発のための破壊基準を得る目的で、航技研

を含め世界的に精力的に研究が行われてきた。複合固体推進薬は材料強度的には「粒子充填ゴム系複合材料」とも言うべきもので、その変形・破壊挙動は複雑を極める。従って、その強度的研究としては、高分子粘結剤単体の強度が主流を占め^{5.1), 5.2), 5.3)}、さらに充填粒子・粘結剤接着^{5.4), 5.5)}、推進薬の欠陥敏感性(ノッチ効果)^{5.6), 5.7)}、等が行われてきた。しかしながら、推進薬破壊は、破壊過程として考えなければならず、破壊過程における累積損傷についての研究は少なく、クリープについては、かなりの実績があるものの、繰返し荷重(疲労)による応力-繰返し回数曲線(S-N曲線)や^{5.8), 5.9)}、その際表われる“Mullins 効果”については、ほとんど研究されていないのが現状である。最近、下段のロケットの燃焼中などに発生する振動に対して、アポジモータ等の上段モータの耐振動性が問題となってきているが、航技研ではこれを先取りする形で、昭和55年度に推進薬の疲労の研究を開始している。それは、これまでの研究からは、推進薬疲労が事実上欠落していること、小数回繰返し荷重試験(第1章参照)を手がけてきたこと^{5.9)}、さらには、一般に材料の強度においては、疲労は最重要課題であり、鉄をはじめとする金属材料においては、クリープ等より重視され、「疲労屋」と呼ばれる研究者集団が存在するほどであるのに対し、推進薬においては、引張、クリープ、応力緩和の各試験のみで、クリープ試験データにて疲労試験データの代用をさせざるを得ない世界的状況であったこと等による。この原因の一つは、市販されている金属材料用疲労試験機では、推進薬の疲労試験は不可能で、専用試験機の開発から始めなければならないこともあろう。ここでは、推進薬用疲労試験を世界で初めて本格的に開発し、それにより、国産開発のアポジ・モータ用推進薬についての疲労寿命の統計的特性を得たので、これらについて述べる。

5.2 供試体

供試推進薬は、国産開発のアポジ・モータ用推進薬の一種であり、その組成を表5.1に示す。推進薬試験片はいわゆるダンベル型で、推進薬ブロックから切れ出されたものである。その形状はJANNAFにて指定され、日本では推進薬物性懇談会で決められたいわゆる物懇型と相似で、その7/10縮尺としたものである。7/10に縮尺した理由は、推進薬の寸法効果はこの程度の縮尺では問題にならないこと(第3章)、疲労損傷の燃焼特性への

表5.1 国産アポジモータ用推進薬 BP-101Jの組成

名称	HTPB粘結剤	AP	Al
BP101J	11 wt %	73 wt %	16 wt %

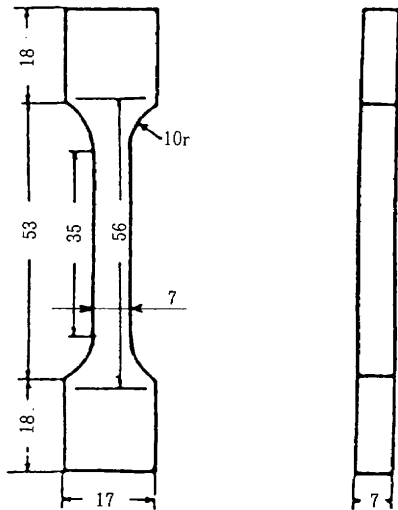


図5.1 7/10 縮尺物懇型試験片の形状寸法

影響を調べるために、疲労試験後の試験片にてストランド燃焼試験を行なう計画としたが、ストランド燃焼にはφ7程度のストランドが標準であるのに対し、物懇型試験片は、標線間部分が10mm×10mmの角柱であり、これからφ10のストランドを作成するとストランド燃焼時の燃焼ガス量や発熱量が多すぎて、ストランド燃焼試験が困難となること等である。試験片形状寸法を図5.1に示す。

5.3 推進薬用疲労試験機の開発

固体推進薬の引張強度は20℃において1MPa程度であり、試験片の断面積は0.5~1cm²であることから、疲労試験時の負荷は100N程度となり、その荷重制御分解能は1N程度が要求される。また、固体推進薬は粘弾性材料であることから、温度・時間依存性を有するため、荷重繰返し数を広範囲に制御できるものでなければならない。

今日、一般に市販されている金属材料用疲労試験機の中に、上記二条件を満足するものは見当たらない。負荷が小さく、荷重制御分解能の高い疲労試験機は、一般に偏心荷重回転式であり、一定周波数型である。一方、広範囲の荷重繰返し周波数制御性を有するものは、一般に電

気-油圧サーボ式であり、卓上型の超小型のものでも荷重容量の75kN、荷重制御分解能は1kNとなり、要求条件とは3桁もの差異が存在する。そこで、NALでは広範囲荷重周波数のために、電気-油圧サーボ式を採用しながら、荷重容量を3桁下げ、荷重分解能を3桁向上させた推進薬専用の疲労試験機を開発することとした^{5.10}。電気-油圧サーボ系はこのような小荷重、高荷重分解能にては一般に使用されておらず、開発はかなり困難であったが、ピストン受圧面積の縮小、油圧作動圧力の21MPaから7MPaへの低下、チャック等可動部の軽量化、ピストン・シール部の摩擦抵抗を小さくするための工夫等を重ね、作動オイルの一部を洩らす等を行うことにより、開発に成功した。表5.2に開発した推進薬用疲労試験機と一般的金属材料用卓上型疲労試験機の仕様比較を示す。ここでは、推進薬が大変形材料であることから、引張ストロークを2倍にしている。この表でわかるように、両者に共通する仕様は荷重周波数範囲だけである。本疲労試験機の構成を図5.2に示すが、これは一般的電気-油圧サーボ式疲労試験機と何ら変るところはない。図5.3に試験機体の形状寸法を示す。一般の疲労試験機に比して剛性不足のように見えるが、3桁も小荷重容量のため、これで十分である。このような小荷重容量では、疲労専用ロードセルは市販されていないので、ここでは小型軽量の引張圧縮用ロード・セルを用いている。また、

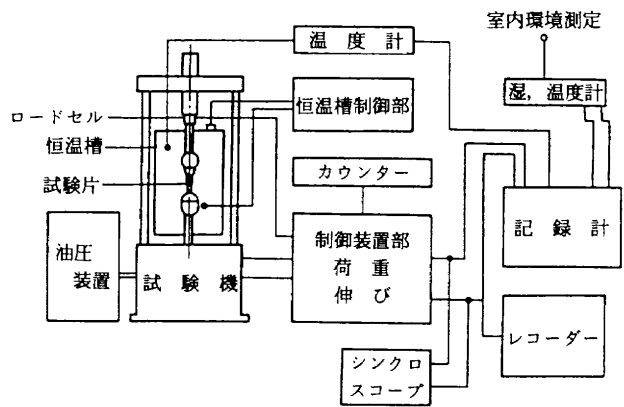


図5.2 低周波疲労試験装置概要

表5.2 開発した固体推進薬用電気-油圧サーボ式疲労試験機と卓上型金属材料用電気-油圧サーボ式疲労試験機の仕様比較

	固体推進薬用 疲労試験機	金属材料用卓上型 疲労試験機
最大荷重	±0.5kN	±75kN
作動荷重範囲	±0.5, ±0.25, ±0.1, ±0.01kN	±75, ±50, ±25, ±10
荷重制御分解能	±1N	±1 kN
最大引張ストローク	±50mm	±25mm
周波数範囲	0.01-40Hz	0.01-40Hz

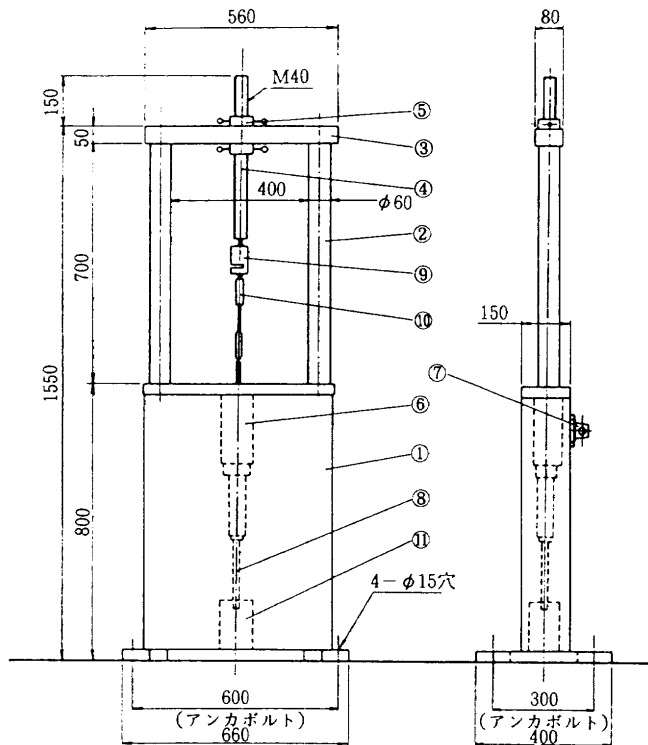


図5.3 固体推進薬用疲労試験機本体の形状寸法

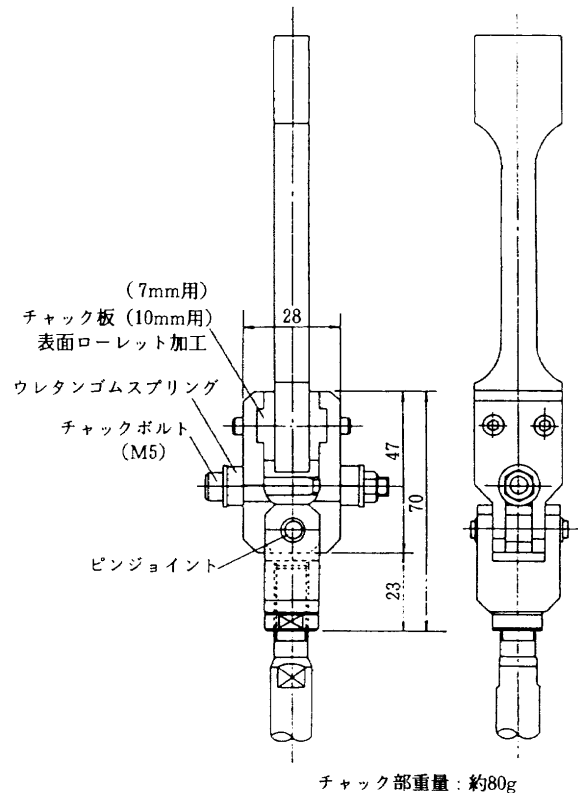


図5.4 固体推進薬用疲労試験機のチャック部

推進薬はゴム材料でやわらかいので、チャック用材料としては、アルミ合金でも十分の硬度、強度があるので、軽量化のため、図5.4に示すように、わずか80gの質量のチャックを設計製作している。このチャックは、物懇型試験片のフルサイズまで使用可能である。油圧源としては、定格圧力7MPaのものを採用した。

5.4 実験結果

5.4.1 “Mullins 効果”

固体推進薬の単軸引張における応力-歪曲線は、累積損傷の影響があり、試験片がバージンの場合（第一回目の引張の場合）に比較して、2回目以降では試験片が弱化、軟化して現われる。これを“Mullins 効果”と言い、推進薬の場合には、充填粒子と粘結剤との剝離、粘結剤の切断によるものであり、弱化領域、弱化程度は予歪が大きいのほど大きくなる^{5,11)}。この現象は破壊エネルギー密度によって評価されている。疲労試験の場合にも“Mullins 効果”は当然、図5.5のように表れ、この場合も同様に応力レベルの高いほど弱化領域、弱化程度は大きくなっている。このことから、疲労の場合も、予歪を与えた場合と同様の破壊過程を進行すると考えられる。

5.4.2 温度上昇

固体推進薬は粘弾性材料であり、変動応力に対して変形は位相おくれを生ずる。疲労試験の場合にはこれは応

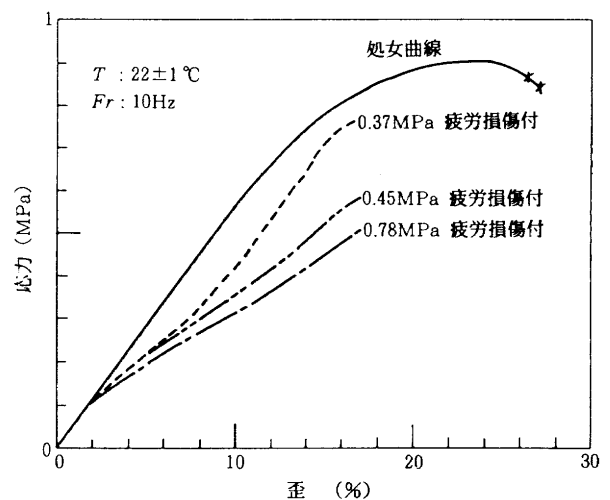


図5.5 応力-歪曲線に及ぼす疲労損傷の効果

力-歪曲線のヒステリシス・ループとなって現われ、このループ面積はエネルギーに相当し、推進薬の内部破壊エネルギーをも含むものであるが、大部分は熱エネルギーに変換して、試験片温度の上昇をもたらすことになる。推進薬の物性・強度は温度に強く依存しており、この温度上昇を評価しなければならない。ここでは、まず負荷応力の形式を区別しよう。図5.6に“片振”（正弦波応力の平均値が最大値の半分で、最小値が零の場合）と“両振”（引張・圧縮の最大応力の絶対値が等しく、平均応力は零の場合）とでの歪振幅の差異を示す。応力が

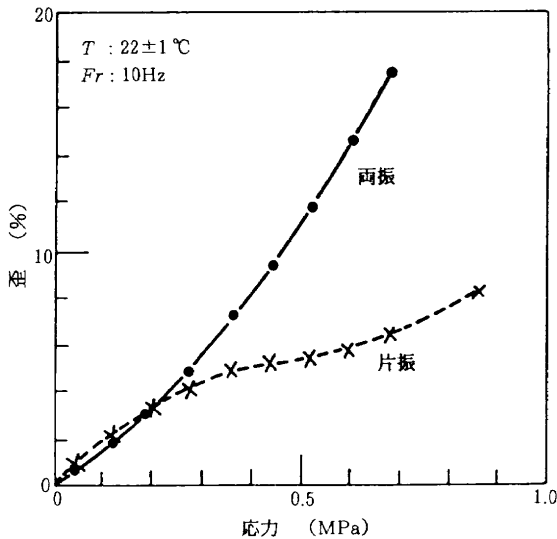


図5.6 “片振り” および “両振り”
 疲労試験における応力振幅と歪振幅との関係

小さい場合 (0.3 MPa 以下) では両者に差異はほとんどないが、これは、この応力範囲では推進薬がほぼ線形の応力-歪特性を示し、かつ、推進薬にはほとんど損傷は発生・累積しないことを示す。応力が 0.3 MPa 以上では、充填剤粒子と粘結剤との剥離が顕著となり、応力-歪特性も非線形性が著しくなるために、両者の歪振幅に大きな差異が表われると考えられる。

次に推進薬試験片の中央部に、銅・コンスタンタン熱電対 (φ0.2) を埋め込み、片振り、両振りにての温度上昇を測定した結果を図5.7に示す。片振りでは、500 kPa 以上では、熱電対埋め込み位置より試験片が早期に切断してしまうため、試験片温度が飽和するまで測定す

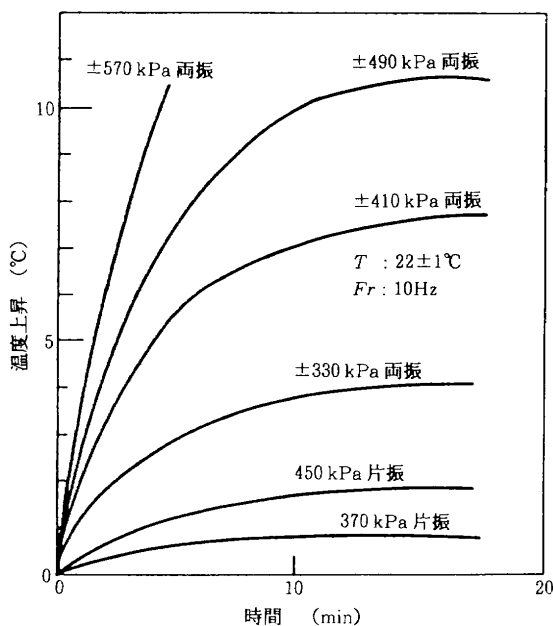


図5.7 疲労試験中の推進薬の温度上昇

ることはできなかった。両振りでは、試験片は簡単には切断しないため、かなり高い応力レベルにおいても試験が可能であった。図5.7よりわかるように、実際に疲労試験で採用する片振りでは温度上昇は2°C程度に留まっており、試験片の環境温度を制御する恒温槽の温度精度が±1°Cであること、試験温度は10°C間隔であることから、この温度上昇は恒温槽温度を2°C低く設定することで補正することにした。両振りは温度上昇が著しいこと、試験片切断が容易に生じないこと、疲労強度の代表的特性曲線であるS-N曲線は通常片振りで行われること、実機モータにおいて、推進薬の疲労破壊の可能性のある場所は、一般に引張応力状態の場所であり、そこに振動応力がかかれば片振りに近い状態となること等により、今後の試験は原則として片振りを採用することにした。

5.4.3 疲労寿命分布

疲労寿命試験は、4段階の応力レベルとし、応力周波数は10Hzだけ、環境温度22±1°C、各条件での試験片数25で行われた。さらに、補助的に2段階の応力レベルで試験片数3でも行っている。結果を図5.8 (対数正規確率紙)、図5.9 (ワイブル確率紙) 上にプロットして示した。ここで、プロット点 $P_{i,n}$ としては対称資料累積分布の式

$$P_{i,n} = (i - 0.5) / n$$

を採用している。両図とも、プロット点はほぼ直線に乗っているように見える。表5.4に、対数正規分布及びワイブル分布に対する最小自乗法によるパラメータをこの実験データから算出して示した。さらに、上記両分布に実験データが適合する程度を検定するために、カイ自乗検定を行い、カイ自乗値を図5.10に示すが、すべての応力レベルで、対数正規分布の場合のカイ自乗値がワイブル分布の場合より小さく、対数正規分布の方がよく合致すると言える。

また、図5.11には、表5.3よりのデータからのP-S-N曲線を示す。この図より、応力レベルと繰返し数を指定すれば、破壊確率を求めることができる。また、この図でのP-S-N曲線には、高分子材料に一般に見られ

表5.3 推進薬の疲労寿命分布関数のパラメータ推定値

応力 (kPa)	試験片寸法	対数正規分布		ワイブル分布	
		平均	標準偏差	形状母数	尺度母数
780	25	2.5077	0.08657	6.1081	352
610	25	3.5677	0.09722	5.4028	4 092
530	25	4.2776	0.14490	3.7605	21 939
450	25	5.4432	0.24771	2.1293	359 329

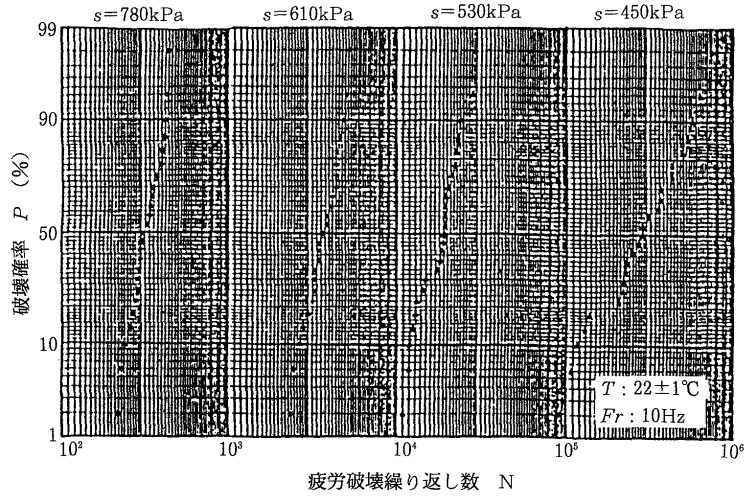


図 5.8 BP-101J 推進薬の疲労寿命分布 (対数正規分布)

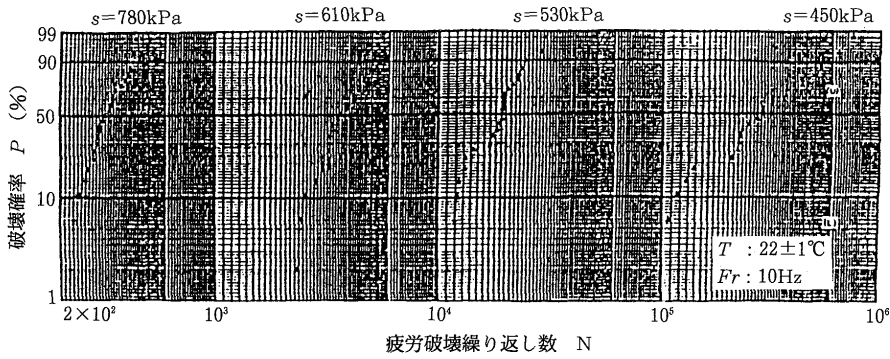


図 5.9 BP-101J 推進薬の疲労寿命分布 (ワイブル分布)

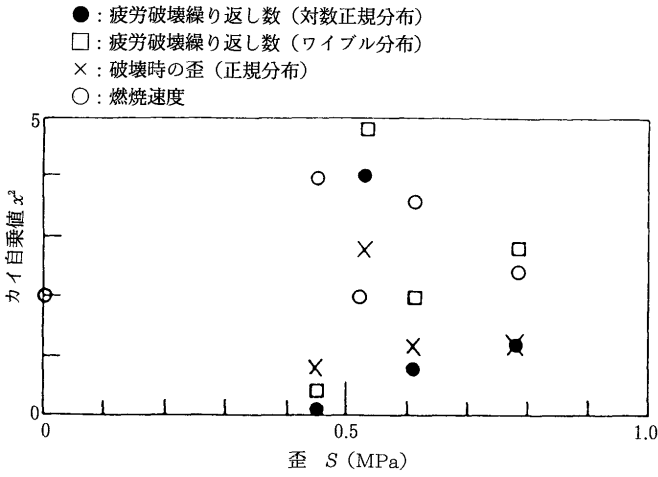


図 5.10 疲労破壊繰返し数, 破壊時の歪, 燃焼速度の分布の各分布関数への適合度のカイ自乗検定

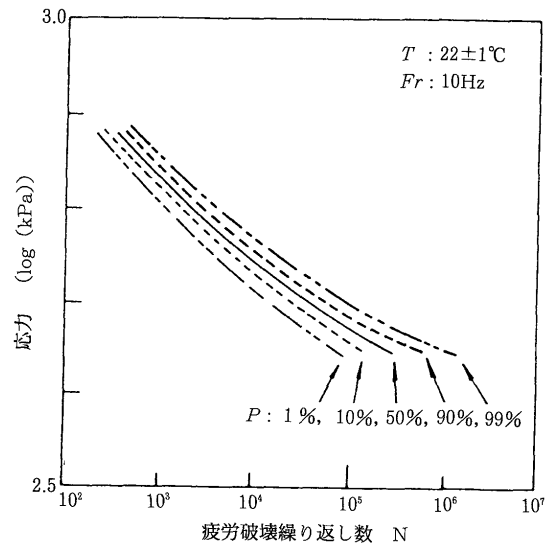


図 5.11 BP-101J 推進薬の P-S-N 曲線

ることであるが、疲労限界は現われていない。

5.4.4 疲労損傷の燃焼速度に及ぼす効果

モータの推進薬には、種々の振動が加わることが予想されるが、それにより推進薬にクラック発生等の破壊を生じなくとも、充填剤粒子と粘着剤の剥離等の損傷は生じ得る。この損傷が燃焼特性に及ぼす影響がもし大きいのであれば、クラック等の破壊が生じなくとも、モータの信頼性は低下する。従って、損傷の燃焼特性に及ぼす影響を調べておく必要がある。

ここでは、損傷レベルとして最大限の場合を想定し、疲労試験にて疲労破壊・切断した試験片の標線間部(7mm×7mmの角柱、長さ35mm)を用い、切断部を薄い接着層で接着し、3側面はエポキシ系接着剤にてレストリクタとし、残る1側面には1mm厚の亚克力板を接着した。この亚克力板には5mm間隔に標線を付し、第3章で述べたように、ヒューズを使わず、TVによる光学観測を行った。燃焼圧力は実機アポジ・モータのチャンバ圧力と同等の3.9 MPaとした。試験片数は疲労試験に使用した試験片全部を使用し、さらにバージン推進薬についても行ったので、5応力レベル×25本=125本となっている。実験結果を図5.12に正規確率紙にプロットして示す。分布パラメータを最小自乗法にて算

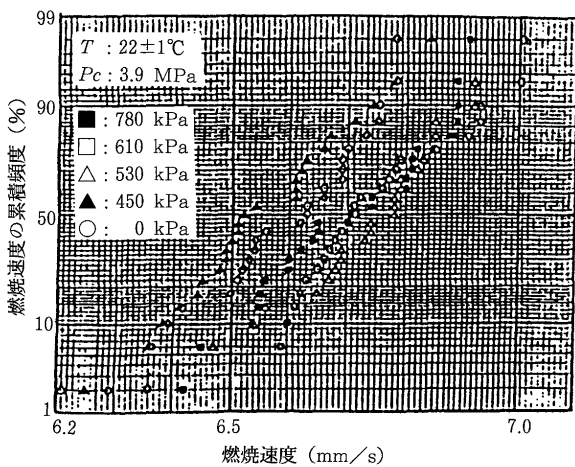


図 5.12 疲労損傷の燃焼速度累積分布に及ぼす影響

表 5.4 疲労破壊歪と疲労破壊推進薬の燃焼速度の正規分布関数のパラメータ推定値

応力 (kPa)	試験片寸法	破壊歪		燃焼速度	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
780	25	11.726	0.45532	6.7000	0.14652
610	25	9.984	0.46180	6.7364	0.15340
530	25	9.082	0.39180	6.7376	0.17199
450	25	8.678	0.39846	6.5524	0.13883
0	25			6.5964	0.13574

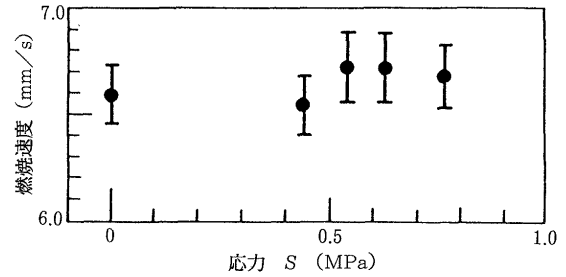


図 5.13 バージンおよび疲労損傷推進薬の燃焼速度の平均±標準偏差の範囲

出し、表 5.4 に破断歪のパラメータと共に示す。さらに、正規分布への適合性の検定のため、疲労寿命分布と同様にカイ自乗検定を行い、図 5.10 に示す。この図で、すべてのカイ自乗値は 5.991 より小さいので、5% の有意水準にて、それぞれの分布に適合していると言える。図 5.13 には疲労応力レベルと燃焼速度の関係を示すが、この図より疲労損傷はわずかに燃焼速度を増加させる傾向がうかがわれる。この原因としては、疲労損傷により生じた充填剤と粘結剤との境界の微小剥離面に火炎が伝播すること等が考えられるが、詳細は今後の研究課題である。

5.4.5 推進薬の疲労過程

金属材料の場合には、片振り疲労試験中の平均歪は一般に非常に小さい(弾性疲労)ので、平均余寿命のような統計的特性は歪履歴によってではなく、クラック進展挙動によって評価される。これに反して、推進薬の場合には、片振り疲労試験での平均歪は疲労損傷の累積と共に増大し、図 5.14 に示すように 20% にも達するので、平均余寿命を歪履歴から推定することが可能となること

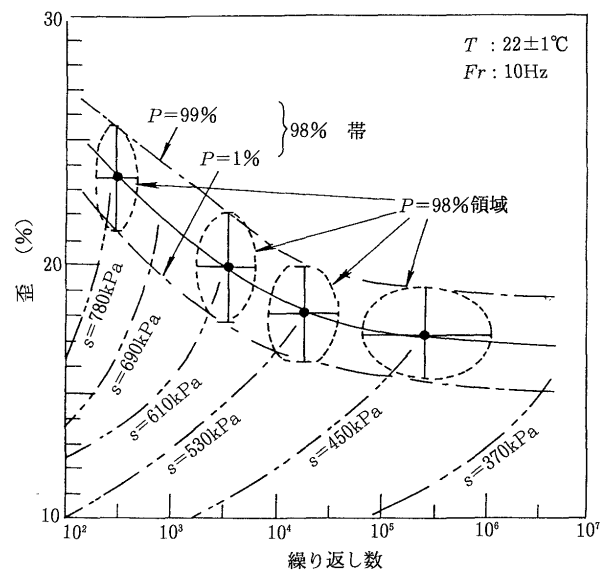


図 5.14 BP-101J 推進薬の疲労破壊過程チャート

が考えられる。同図には疲労歪曲線の中央値曲線、各応力レベルでの破壊確率領域とそれらから内挿法により得られた破壊確率ゾーンが示される。破壊確率領域を表わす閉曲線は同心円的である。この図の上には、疲労歪履歴は各々の試験片について描くことが可能であり、そのため、破断前の試験片についても、初期歪曲線が測定されれば、歪履歴曲線は与えられた応力レベルに対する中央破壊歪曲線に沿って外挿して、対応する破壊確率領域に達することができる。その結果、与えられた繰返し数に対する破壊確率を推定することができる。もし、応力レベルが未知ならば、中央破壊歪曲線と破壊確率領域を指定することができず、上記のような推定はできない。この場合には、各応力レベルでの破壊歪曲線において、その隣接する曲線同士はほぼ平行であるので、初期歪曲線が与えられれば、それは、その曲線の両側の中央破壊歪曲線に沿って外挿して、破壊確率ゾーンに達することができる。従って、与えられた繰返し数に対する破壊確率を推定することができるが、この破壊確率ゾーンは破壊確率領域の中央値を結合・内挿したものであるから、未知の応力レベルに対し、与えられた初期歪曲線が中央破壊歪曲線と一致するとして、応力レベルを推定し、その推定の上に破壊確率を推定していることになる。この推定法を「歪履歴曲線法」と名づけよう。破壊確率を推定するには図5.11のP-S-N曲線を利用する方法(P-S-N曲線法)があるが、この方法がP-S-N曲線法よりも、次の点ですぐれていると言えよう。

P-S-N曲線法では与えられた応力レベルと繰返し数だけで破壊確率は推定されるので、すべての試験片に対して、同じ応力レベルと繰返し数において同じ破壊確率の値が推定される。これに反して、歪履歴曲線法では歪曲線を各試験片について疲労過程の初期だけでも測定することにより、各試験片別に歪曲線を外挿して破壊確率を推定することができ、より精密な推定値が求められる可能性がある。この方法は、実機についても、各部分の歪履歴を求めることにより適用可能であり、今後適用が検討されるべきであろう。もちろん、この方法には多くの仮定が含まれており、より多くの実験的理論的検討も必要である。

5.5 まとめ

- (1) 固体推進薬の疲労試験のために、小荷重容量・高荷重制御感度、大変位・広荷重周波数領域の電気-油圧サーボ式疲労試験機の開発に成功した。
- (2) 国産開発中のアポジ・モータ用推進薬の一種について、その疲労強度の統計的特性を得た。
- (3) 推進薬の疲労損傷の燃焼速度への影響を明らかにした。

- (4) 得られたデータは、国産開発のアポジ・モータをはじめとする固体モータの高信頼性設計に有用である。

5.6 参考文献

- 5.1) W.G. Knauss; Proc. 1st Conf. on Fracture, Sendai, Japan, Vol. 2, 1965, pp. 1139-1166.
- 5.2) T. L. Smith; J. Polymer Sci., Part A, 1, 1963, pp. 3597-3615.
- 5.3) J. H. Wiegand; ARS Journal, April 1962, pp. 521-527.
- 5.4) K. Kawata, et al.; Bulletin of the Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 5,4, 1969, pp. 521-532.
- 5.5) M. Shimizu, et al.; Proc. 12th ISTS, Tokyo, Japan, 1977, pp. 501-506.
- 5.6) T. Kunio, et al.; Proc. 8th ISTS, Tokyo, Japan, 1969, pp. 211-216.
- 5.7) M. Shimizu, et al.; Proc. 10th ISTS, Tokyo, Japan, 1973, pp. 217-224.
- 5.8) K. W. Bills Jr. et al.; J. of Spacecraft and Rockets, 3, 3, March 1966, pp. 408-412.
- 5.9) M. Shimizu, et al.; Proc. 1974 Symposium on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Japan, Vol. 1, 1974, pp. 589-598.
- 5.10) M. Shimizu, et al.; Proc. 13th ISTS, Tokyo, Japan, 1982, pp. 167-174.
- 5.11) L. Mullins, et al.; Rubber Chem. and Technol., 30, 1957, pp. 555-571.

第6章 推進薬疲労特性の温度・時間依存性

6.1 はじめに

前章において、固体推進薬疲労試験機の開発に成功し、これにより、手はじめに推進薬疲労寿命の統計的特性を得たことを述べた。これらの統計的特性は金属材料の弾性疲労にも共通する特性項目であり、極めて基本的なデータであると言えよう。ところで、固体推進薬は、前章でも述べたように「粒子充填ゴム系複合材料」の一種と考えられ、当然のことながら粘弾性材料である。従って、その物性・強度は温度・時間依存性を有するのが一般的であり、静引張、クリープ等の試験におけると同様に、疲労試験においても、温度、時間依存性試験を行う必要がある。それによってこれまで、振動荷重についても、クリープ試験データにて代用してきたが、それが正当かどうかを確認できることになる。本章では、前章に述べた電気-油圧サーボ式固体推進薬疲労試験機^{6.1)}を用い、温度および荷重繰返し周波数をパラメー

タとし、固体推進薬の疲労試験を実施した。さらに、得られた疲労特性をクリープにおける破壊特性と比較検討した。その結果、疲労における固体推進薬の変形、破壊挙動の温度・時間依存性が明らかとなり、疲労はクリープより同一応力レベルにおいて危険側にあり、今後は推進薬の信頼性保証に疲労試験が不可欠と考えられること等について述べる。

6.2 実験方法

供試推進薬は、H-I アポジ・モータ用固体推進薬の一種、BP-105J (HTPB: 12W%, Al: 18W%, AP: 70W%) である。試験片寸法としては、ここでは、従来行われてきたクリープ試験データとの比較に寸法効果の影響が少しでも入るのをさけるため、前章の7/10物懇型試験片ではなく、10/10物懇型試験片(フル・サイズ)を採用した。

図6.1に本実験に使用した疲労試験機の概要を再度示しておく^{6.1)}。装置は電気-油圧サーボによる荷重・変位制御機構を有し、荷重繰返し波形、繰返し周波数が可変である。また、しゅう動部の摩擦抵抗を減少させる等して、微小な荷重振幅を正確に負荷できるように考慮されていることは前章に述べたとおりである。

疲労試験は、前章同様の引張応力側の片振試験法によった。従って、試験片に負荷される荷重は、ある定められた引張荷重最大値と無負荷状態の間で周期的に変化する。この引張荷重最大値が、疲労試験の荷重振幅を表わす。そこで、疲労試験においては、この荷重最大値をもって試験荷重とし、これら破断時の試験片断面積で除して負荷応力(真応力)を求めた。前章では試験前の試験片断面積で除した公称応力を採用しているが、これは破壊過程の考察に有効であるからである。ここでは、クリープ試験データと比較するために、クリープ試験にて採用している真応力を採用している。

試験精度を維持する必要上から、荷重繰返し周波数

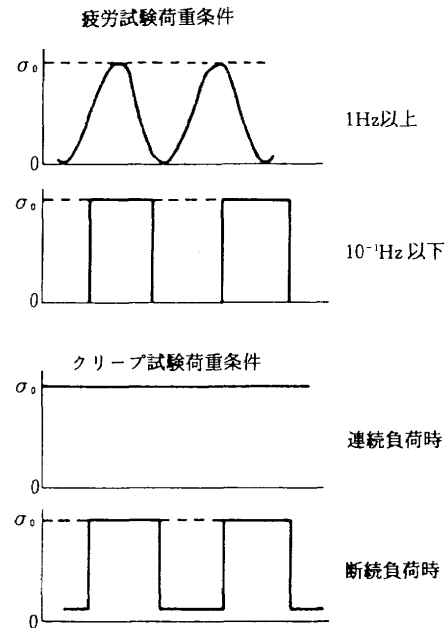


図6.2 試験荷重波形

1 Hz以上の周波数領域にての試験では、荷重波形を正弦波とし、 10^{-1} Hz以下の低周波領域での試験には方形波を用いた。図6.2に、各試験繰返し波形を示す。荷重条件による変形挙動の相異をより明確にするために、一部のクリープ試験では、荷重の周期的な中断を行った。図6.2において、クリープ試験として示した方形荷重波は、この荷重中断試験法によるものである。

推進薬の疲労特性は、温度および荷重繰返し数をパラメータとし、負荷応力の最大値(応力レベル)と負荷開始より破断に至るまでの負荷時間および応力繰返し数を測定することにより求めた。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 疲労特性の周波数依存性

金属あるいはプラスチックなどにおける疲労破壊は、一定の応力振幅に対しては、ある繰返し数の後に発生する。すなわち、疲労破壊過程の中に応力繰返し数に対応して損傷の進行する過程が存在する。従って、一般の材料の疲労特性は、応力振幅Sと破断までの応力繰返し数Nとの関係を示すS-N曲線として求められる。

一方、固体推進薬の変形破壊特性は、粘弾性体の特徴的な速度過程によることが知られている。そこで、固体推進薬の疲労特性における負荷応力と破断までの応力繰返し数および破断時間についての実験を行った。図6.3に、各周波数毎の負荷応力と破断時間との関係を示す。 10^{-2} Hzから30 Hzまでの周波数範囲において、固体推進薬は破断時間に関して、ほぼ同様の応力-時間曲線(S-T曲線)が得られることがわかる。従って、固体推進薬の疲労破壊は、他種材料と異なり応力繰返し数に対

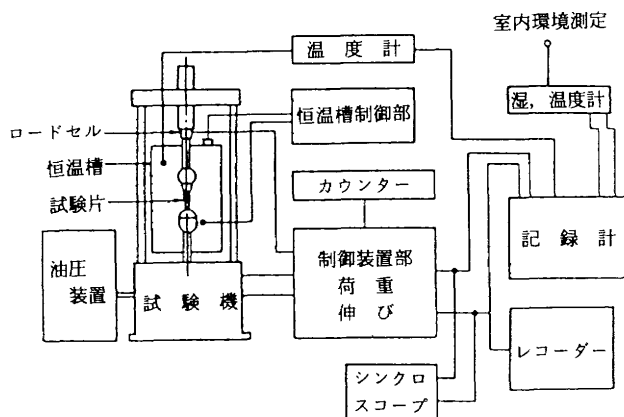


図6.1 疲労試験装置概要

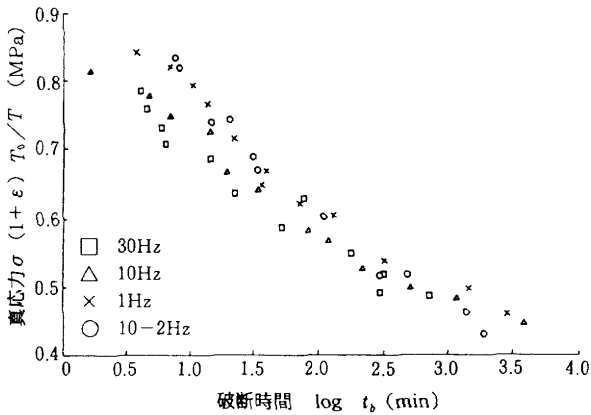


図 6.3 疲労特性の周波数依存性

する依存性はほとんどなく、負荷応力と破断時間との関係として疲労特性が求められることになる。このため、以降の疲労特性試験結果はすべて負荷応力と破断時間の関係（S-T 曲線等）として整理することにした。

6.3.2 疲労特性の温度依存性

従来、研究例の多い定歪速度引張試験、クリープ試験などの静的荷重条件下での推進薬の物性・強度測定では、その変形破壊挙動は粘弾性的な特徴を示すと共に、各温度にて測定した結果は温度・時間の移動係数を用いることにより、基準温度における一本のマスター・カーブとして集約できる^{6.2)}。そこで、本試験においても同様に、80℃から室温までの各温度において得られた疲労およびクリープ試験データのそれぞれについて、移動係数を定め、20℃におけるマスター・カーブを求めた。図 6.4 にその結果を示すが、疲労およびクリープのいずれの試験結果も、マスター・カーブとして十分なまとまりを示している。すなわち、推進薬の疲労特性についても、他の物性・強度と同様に、温度時間換算則が成立する^{6.3)}。さらに、疲労、クリープおよび通常の定歪速度引張試験結果のそれぞれから導いた移動係数の比較を図 6.5 に示す。この図から、負荷形式のいかんにかかわらず、温

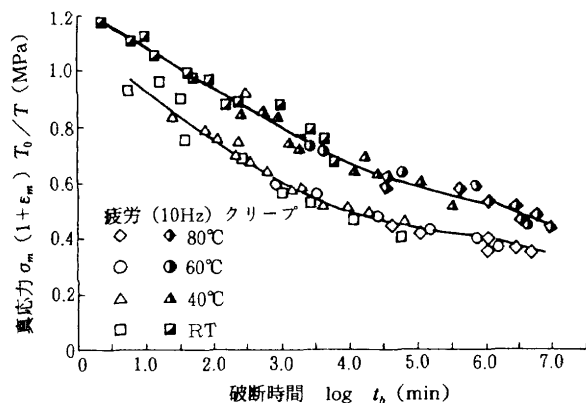


図 6.4 疲労・クリープ破壊特性

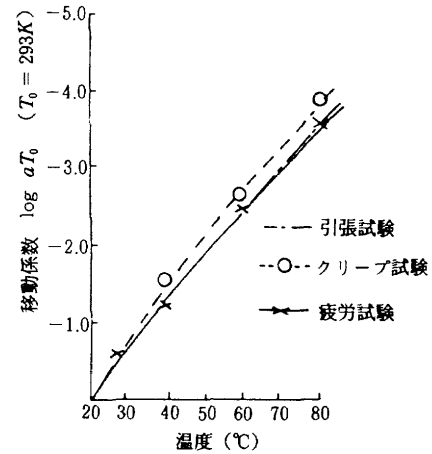


図 6.5 移動係数の比較

度時間の移動係数はほぼ同一であることがわかる。つまり、材質が同じであれば、推進薬の疲労破壊過程は、他の応力負荷形式における場合と同様の熱レオロジー過程によると考えられる。

6.3.3 応力状況による破壊挙動の相異

図 6.4 に示したマスター・カーブにおいて、疲労とクリープの破断時間を比較すると、同一の応力レベルではクリープの方が破断時間が長い。すなわち、本推進薬では、ある引張応力が一定・連続して負荷される場合より、応力が周期的に変動（ただし、最大値は一定応力の場合と同一）する場合の方が破断時間が短い。しかも、その差異は全応力範囲にわたって、約 1 桁であり、極めて大きいと言える。

クリープは、応力周波数が零の場合に相当すると考えられることから、図 6.4 の場合より低周波においてはどうか注目される。すなわち、応力周波数が零に近づくに従って、破断時間はクリープのそれに近づくことが考えられるが、それはどの周波数領域において生ずるかを明らかにする目的で、10⁻¹Hz から 10⁻⁴Hz での矩形波疲労試験を行った。その結果を図 6.6 に示す。図中の点線は同一応力レベルでの 10Hz 正弦波疲労およびクリープの破断時間を示す。応力繰返し周波数の低下に伴い、破断時間が増加する傾向が顕著に認められる。10⁻³ Hz 以下の周波数では破断時間がクリープのレベルを上回っているが、これは、極低周波の疲労試験の場合、試験片の破断までにわずか数回の応力繰返ししか与えられないため、除荷時間の影響により、見掛上の破断時間増加を生じたためであろう。すなわち、この場合には疲労試験というよりも、繰返しクリープ試験とも言うべき試験となっているので、除荷時間が破壊にあまり関係しない形になっているのである。

また、応力波形が正弦波の 10Hz での疲労破断時間と、

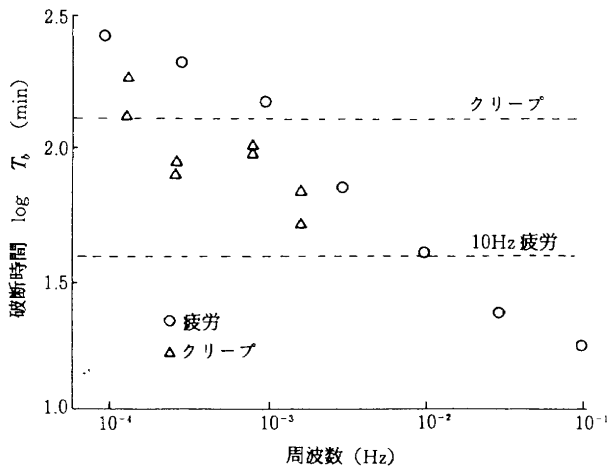


図6.6 破断時間の周波数依存性

10^{-2} Hz以上の周波数領域での試験結果との比較から、疲労試験における破断時間は、応力繰返し周波数だけでなく、応力繰返し波形にも依存することがわかる。 10^{-2} Hzでは両者は一致しているが、両者の歪速度を調べてみると、一致していた。このことから、応力繰返し波形依存性は、歪速度依存性である可能性があるが、この問題についてはデータ不足から、これ以上のことは言えない。

図6.7には、疲労およびクリープそれぞれの破断歪の比較を示す。疲労およびクリープそれぞれについては、破断時間によらずほぼ一定の破断歪となっている。しかしながら、その破断歪は負荷形式により、異なった値をとっている。すなわち、疲労破断歪はクリープ破断歪の約半分であり、歪破壊の観点からは疲労はクリープより危険側にある。このことは図6.4において、疲労破断時間がクリープ破断時間の約1/10であることも対応していると考えられる。これらの結果から、固体推進薬の疲労は、破断歪、破断時間のいずれの観点からも、クリープと比較してかなり危険側にあると言える。今後、推進薬の強度評価には、従来のクリープ試験データだけでは

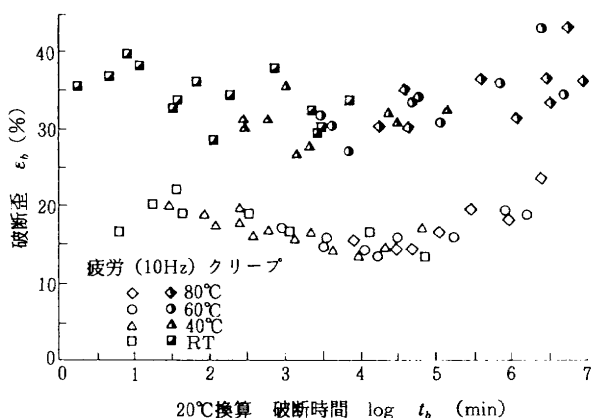


図6.7 破断時間と破断歪の関係

不十分であり、疲労試験データが必須であると考えられる。

6.4 まとめ

H-I アポジ・モータ用固体推進薬 BP-105J の疲労の温度・時間依存性試験を行い、以下に示す結論を得た。

- (1) 推進薬の疲労破壊特性は、荷重繰返し数には依存しないので、通常のS-N曲線でなくS-T曲線にて評価することができる。
- (2) 疲労、クリープ、静引張の各試験において、破壊挙動の温度依存性はほぼ等価である。
- (3) 極低周波疲労試験では、周波数の低下に伴い、破断時間はクリープの破断時間に一致する傾向が認められた。
- (4) 同一応力レベルにおいて、疲労破断時間はクリープ破断時間より一桁ほど短い。また疲労破断歪はクリープ破断歪の約半分である。これらのことから、疲労はクリープよりかなり危険側にあり、今後、推進薬の強度評価には、疲労試験は必須であると考えられた。

6.5 参考文献

- 6.1) M. Shimizu, et al.; Proc. 13th ISTS, Tokyo, 1982, pp. 167-174.
- 6.2) T.L. Smith; J. of Polymer Science:Part A, Vol. 1, 1963, pp. 3597-3615.
- 6.3) H. Okuhara, et al.; Proc. 14th ISTS, Tokyo, Japan, 1984, pp. 89-95.

第7章 高周波疲労試験機の開発

7.1 まえがき

固体推進薬の強度についての研究は、従来、静引張試験、クリープ試験によるものが主流をなしており、疲労試験によるものはほとんど見当らず、わずかに K. W. Bills Jr. 等^{7.1)}が、1960年代にクリープ等と共に累積損傷についての研究の中に5Hzでの疲労試験を含ませた例があるのみである。米国においては機密研究の中には当然、推進薬の疲労強度研究は存在すると思われるが、現在入手可能な文献の中には、静引張試験、クリープ試験による破壊、強度、信頼性保証のレポートは多数存在するにもかかわらず、推進薬の疲労を表面から採り上げた文献は見当たらない。航技研では昭和55年度より推進薬の疲労を採り上げ、第5章で述べたような固体推進薬用電気-油圧サーボ式疲労試験機の開発、H-I アポジ・モータ用推進薬の疲労強度の統計的特性の研究、疲労損傷の燃焼特性に及ぼす影響の研究^{7.2)}、第6章に述べたような疲労特性の温度・時間依存性の研究^{7.3)}を行っ

てきた。しかしながら、電気-油圧サーボ式疲労試験機は、その試験周波数範囲が実質的には20Hz以下であり、これ以上になると試験が困難となる。一方、実機モータが飛行中等に受ける振動は100Hz以上ともなり得ることから^{7.4)}、高周波型の疲労試験機の開発^{7.5)}が望まれてきた。

ここでは、従来の電気-油圧サーボ式疲労試験機を低周波疲労試験機と名づけることにし、これを改造して動電型加振機を組込むことにより、100Hz以上の高周波での疲労試験を可能とする高周波疲労試験機を開発したので、これについて述べる^{7.6)}。

7.2 高周波疲労試験機用動電型加振機の選定

図7.1に従来の低周波疲労試験機の構成を示す^{7.2)}。通常の金属材料用電気-油圧サーボ式疲労試験機は卓上型でも荷重容量75kN程度、最適荷重約50kNであり、5kN以下の試験は不可能であるのに対し、本試験機は荷重容量500N、荷重制御分解能は約1.0Nを実現している。そのため、油圧駆動しゅう動部の摩擦抵抗を低減させるために、作動油の一部を洩らす等の工夫がなされている。

本試験機による推進薬疲労試験は、10Hzまでの荷重周波数では十分良好な状態で行なうことができるが、20Hz以上になると、変位振幅の減少による試験応力振幅の減少と荷重波形のゆがみが問題となる。パワーを上げて変位振幅を増大させると、荷重波形のゆがみはますますひどくなる。

このような問題を解決し、100Hz級の疲労試験を行うため、動電型加振機を導入することにした。その理由としては、動電型加振機は音響用スピーカと同様の原理・構造によっており、小型簡便かつ広い周波数特性(5~10,000Hz以上)を有する点に注目したためであり、他にこのような特性を有するものは見当たらない。ただし、動電型加振機は、通常は直流成分を発生しない。推進薬

の疲労過程においては、試験片は疲労損傷の増大と共に歪が発生・増大するので、試験片に加わる荷重条件を一定に保つためには、変位オフセット量を歪に応じて増大させなければならない。そこで変位オフセットに相当する直流成分は従来の電気-油圧サーボ系に担当させ、動電型加振機は交流成分だけを担当させることにした。

交流成分を担当する動電型加振機に求められる条件は以下のとおりである。

- (1) 超小型軽量で、低周波疲労試験機の下部可動ロッドとチャックの間に組込み可能な形状、構造である。
- (2) 加振力は必要最小限とし、反力によるフレーム、ロッド、ロード・セル等の有害振動を低レベルに押えることができる。
- (3) 試験片に動的試験荷重を負荷するための十分に大きい振幅(従って、十分に大きい加速度)が取れる。

このことから、加振機の質量10kg以下、加振力100N、加速度100g_n程度の加振機が望ましいが、市販の超小型加振機はすべて永久磁石型で、加速度は最高で50g_n程度であり、上記条件に適合するものは見当たらない。そこ

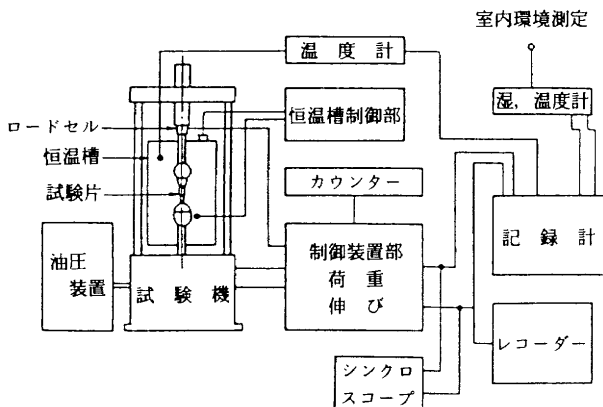


図7.1 低周波疲労試験装置概要

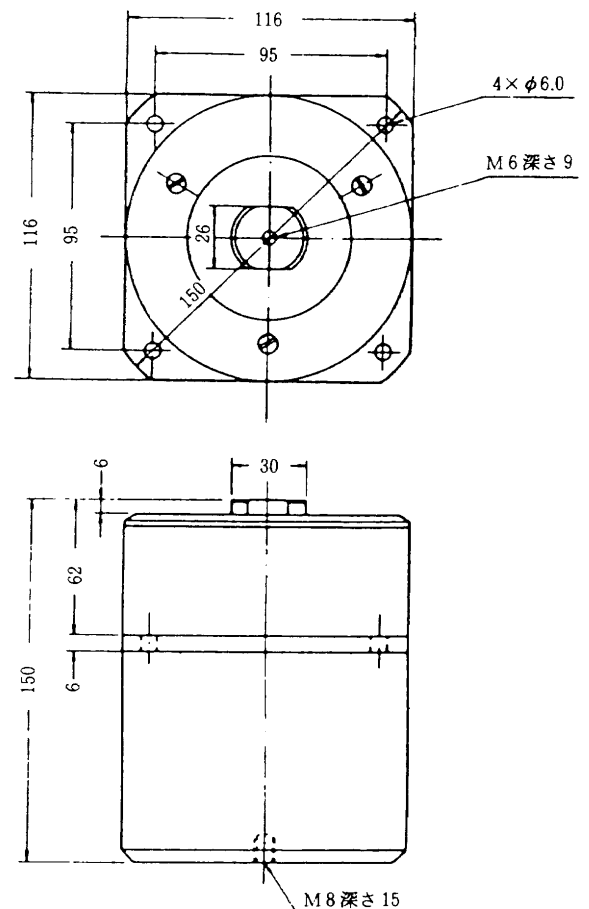


図7.2 疲労試験機用動電型加振機(PET-5)の形状寸法

表 7.1 動電型加振機の仕様

型 名		PET-05
加 振 力 (N)		50
振 動 数 範 囲 (Hz)		2~14,000
最 大 加 速 度 (gn)		33
最 大 変 位 (mm (P-P))		5
振 動 台	テ ー ブ ル 支 持 方 式	ダイヤフラムバネ
	テ ー ブ ル 支 持 バ ネ 定 数 (N/cm)	160
	可 動 部 質 量 (g)	150
	テ ー ブ ル 寸 法 (φ mm)	30
	試 料 取 付 ネ ジ	M 6-1
所 電 源	電 圧	AC100V±10% 50/60Hz
	電 力 (VA)	100
使 用 温 度 範 囲		273~313K
冷 却 方 式		自然空冷
振 発 生 動 機	型 名	PET-05
	寸 法 (mm)	□116×H150
	質 量 (kg)	5
電 力 増 幅 器	型 名	PET-0A
	出 力 電 力 (VA)	30
	寸 法 (mm) (W×H×D)	260×150×300
	質 量 (kg)	8

で、試験片の寸法を、寸法効果のあまり出ない範囲で縮小することにした。この問題は既に第5章でも述べたが、疲労損傷の燃焼特性への影響を調べるために、切断後の試験片をストランド燃焼試験装置にて燃焼速度を測定する場合にも、7mm×7mm程度の大きさが好適であることから、ここでも、物懇型試験片の7/10縮尺試験片を採用した。その結果、変位振幅つまり加速度の条件が緩和され、市販の超小型加振機にて上記条件を満足しうることになった。選定した加振機はIMV社のPET-5で、その仕様を表7.1に、形状寸法を図7.2に示す。そして、加振機低部のM8ネジを利用して、油圧アクチュエータのピストン・ロッドに取り付ける。また加振機の振動台上のM6ネジを利用して、先端にチャックの付いたロッドを振動台上に取り付ける。その取付状況を図7.3に示す。

7.3 動電型加振機の制御

加振機の振動台上の質量増加は、そのまま加速度の減少すなわち変位振幅の減少、そして荷重振幅の減少につながる。振動台上の質量軽減は最重要課題である。ここでは、比強度、比剛性について最高の材料の一つであるCFRPチューブ(φ15)を、振動台上のロッドとして採用し、取付部はアルミ合金製とした。さらに、下部チャックもアルミ合金製とし、低周波疲労試験機のチャックより極端に薄肉として製作した。図7.4にCFRPロッド、図7.5に下部チャックを示す。これらの軽量化の結果、振動台上の質量は試験片を除き50g以下となり、20

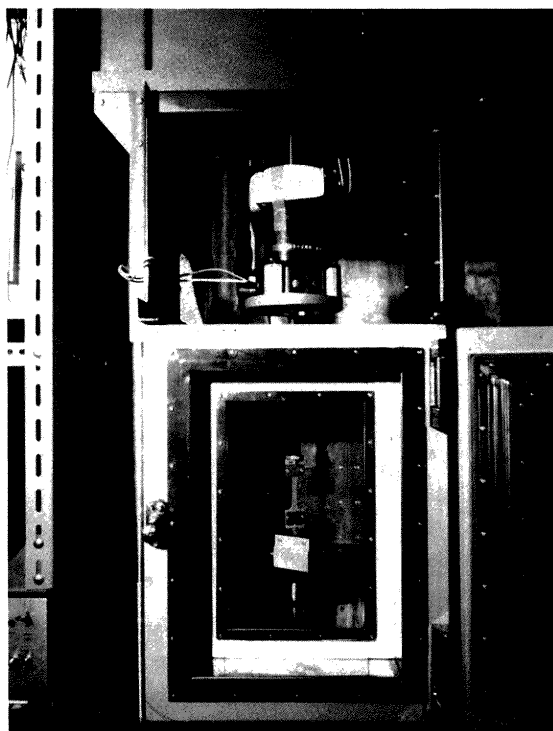


図 7.3 低周波疲労試験機への動電型加振機の組込

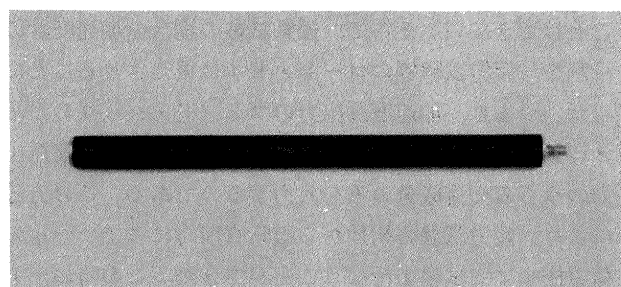


図 7.4 高周波疲労試験機用CFRPロッド

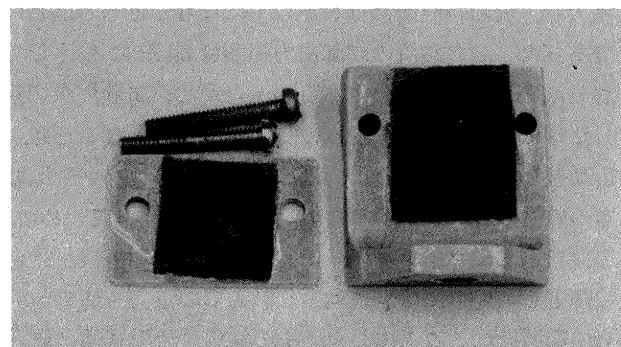


図 7.5 高周波疲労試験機用アルミ合金製チャック

g_n の加速度を確保した。

また、上部チャックも上述の下部チャックと同様に20gに軽量化されたので、加振機の反力によって生ずる上部チャックの振動がロード・セルに伝播して発生する荷重ノイズは、加振力の1%以下に抑えられた。また、加振機の反力に対しては電気-油圧サーボ系も荷重制御しているので当然に反応するが、応答周波数特性を高周波側に鈍感に調整することにより、100Hzでは応答レベルは-20dBを達成し、油圧ピストン・ロッドの応答はほとんど無視し得る程度となった。ピストン・ロッドを荷重制御でなく変位制御に切換えて、荷重変動に反応しないようにしても、ピストン・ロッドの振動レベルはほとんど変化せず、このことから、むしろピストン・ロッドの油圧保持剛性の不足の方を問題としなければならない状況であった。

加振機の電力容量は30Wと小さいので、市販のオーディオ用低価格アンプを使用した。また、加振機の制御は、IMV社の自動振動制御器CUB-VCを使用した。この制御器は、指定周波数範囲を一定加速度で掃引する目的の装置で、振動試験系の周波数特性が一定でないことから、一定の加振信号出力では一定加速度加振とはならないので、振動試験系に加速度計を装備し、その加速度計の出力が一定となるように加振信号出力を制御する方式となっている。ここでの疲労試験においては、通常、周波数掃引は行わないが、試験片の疲労損傷の累積、試験中の試験片の温度上昇等により、試験片が軟化するので、一定加振信号出力で加振した場合には荷重振幅がしだいに減少することになり、一定荷重振幅での試験を行なうことはできない。そこで、振動試験の場合の加速度計の役割を、疲労試験機のロード・セルに果たさせることにした。つまり、加速度計出力のフィード・バックのための自動振動制御器への入力部に、ロード・セルの荷重出力のうちの交流成分のみを入力するのである。この方式により、疲労試験の初期から破断直前時にまで、一定の荷重振幅にて試験を行なうことができた。この時の出力電流値は、設定荷重により異なるが、初期には0.5A程度であったものが、破断時に近づくにしたがって急速に増大し、破断時直前には6A以上になることもしばしばであった。この装置の制御出力範囲は80dBにも達しており、その能力は十分であるが、ただし、試験片が切断した時には、ロード・セルの交流成分は零となるため、自動振動制御器からの出力は最大となり、アンプや加振器の破壊につながりかねない。この問題をさけるために、加振機下部にマイクロ・スイッチを付け、加振機が一定量降下した場合には、自動振動制御機の出力を切るか、その電源を切ることにした。その結果、疲労試験は無入運転が可能となり、夜間運転等により試験能率を著しく

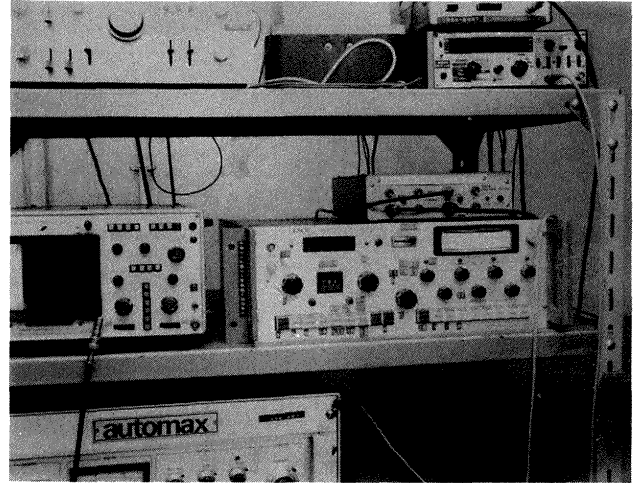


図7.6 高周波疲労試験機の振動制御系

向上させた。振動制御系を図7.6に示す。

7.4 性能評価試験

本試験機により、国産開発のアポジ・モータの推進薬の一種を模したダミー推進薬BP-105Jiについて、疲労試験を試みたところ、環境温度40°C以下においては良好なデータが得られた。60°Cにおいては、試験片の軟化が著しく、加振振幅が不足となった。すなわち、試験初期においても6A以上の電流値を必要としたが、これは、加振機の定格電流容量4Aをかなり上まわり、試験開始1時間後には、加振機のコイルの絶縁材料から、温度上昇による異臭が発生するに至った。このため、この条件での試験の継続は困難と判断した。

図7.7に、ダミー推進薬の疲労データを示す。環境温度、40°C、荷重周波数100Hzの試験条件下のデータは、ある程度ばらついているが、この程度のばらつきは疲労強度データには一般に見られるものであり、これから応力-時間曲線(S-T曲線)を得ることも容易であろう。

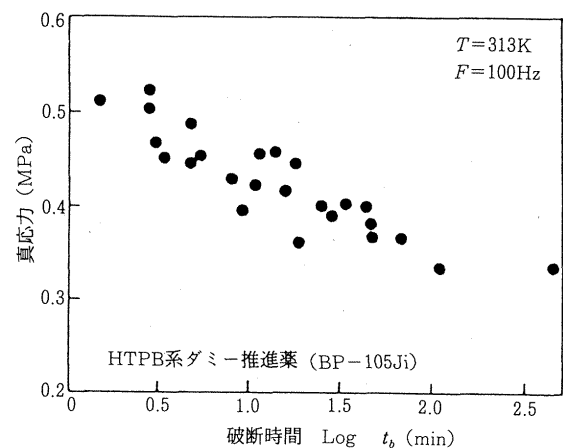


図7.7 試作高周波疲労試験機によるアポジモータ用ダミー推進薬の応力-時間データ(片振り試験)

これにより、本試験機は環境温度40℃以下、100Hzにて、推進薬の疲労試験に適することが確認されたと言えよう。

7.5 まとめ

既開発の電気-油圧サーボ式疲労試験機は10Hz級荷重周波数における試験に適合する低周波疲労試験機であった。しかるに、「上段モータの耐振動保証」を行うためには、実機モータが受けるとされる100Hz級の高周波での試験が必要である。この観点から、低周波疲労試験機に動電型加振機を組込むことにより、100Hz以上での高周波疲労試験の可能な試験機を試作し、性能評価試験を行った結果、良好なデータが得られ、本試験機の開発に成功したと言えよう。

7.6 参考文献

- 7.1) K.W.Bills Jr., et al.; J. Spacecraft, 3, 3, March 1966, pp. 408-412.
- 7.2) M. Shimizu, et al.; Proc. 13th ISTS, Tokyo, 1982, pp. 167-174.
- 7.3) H. Okuhara, et al.; Proc. 14th ISTS, Tokyo, 1984, pp. 89-94.
- 7.4) 斎藤紀男, 外; 第25回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1981, pp. 78-79.
- 7.5) 清水盛生, 外; 第28回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1984, pp. 128-129.
- 7.6) M. Shimizu, et al.; Proc. 16th ISTS, Sapporo, 1988, pp. 183-190.

第8章 国産上段モータ用推進薬の疲労と燃焼

8.1 まえがき

前章に述べたように、NALにおいて固体推進薬用高周波疲労試験機の開発に成功した。そこで、国産開発のH-Iアポジ・モータ用推進薬BP-105J、H-I第3段モータ用推進薬BP-104Jについて、その老化試験前後に各種温度環境下にて疲労試験を行い、その疲労特性データを得ると共に、疲労損傷後の試験片のストランド燃焼試験により、疲労損傷と燃焼速度との関係についてのデータを得た。またHMX添加高性能推進薬BP-109Jについても一部試験を行ったので、その結果についても述べる。

表 8.1 国産上段モータ用推進薬の組成

薬種	組成	HTPB	AP	Al
BP-105J		12 wt %	70 wt %	18 wt %
BP-104J		14 wt %	68 wt %	18 wt %
BP-109J		12 wt %	62 wt % HMX 8wt %	18 wt %

8.2 高周波疲労試験

試験片形状は、物懇型試験片の7/10縮尺のものであり、これは、疲労試験後のストランド燃焼試験を考慮して採用されたことは前章までと同様である。推進薬種はH-Iアポジ・モータ用BP-105JおよびBP-109J、さらにH-I第3段モータ用BP-104Jであり、その組成を表8.1に示す。これらの推進薬は、その老化の影響を調べるため、それぞれ半分については60℃の環境温度に30日間保管してあり、これは20℃の3年間保管に相当する^{8.1)}。

これらの試験片による疲労試験結果を、BP-105J(老化前)については図8.1, BP-105J(老化後)については図8.2, BP-104J(老化前)については図8.3, BP-104J(老化後)については図8.4に示す。これらは一本のマスタ・カーブとしての十分なまとまりを有しており、また、老化の影響は、ほとんど認められない。なお、図8.5, 図8.6には、図8.1~図8.4までの図を作成するために必要な、推進薬静引張試験より得られた温度時間換算係数を、BP-105J, BP-104Jについて示す。これらは日産自動車(株)の協力によるものである。老

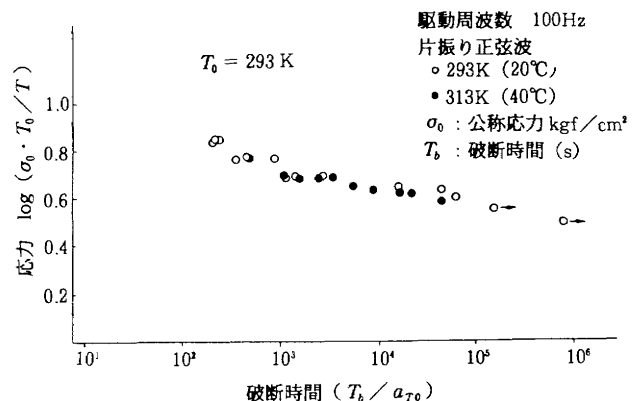


図 8.1 BP-105J 推進薬 (老化前) の高周波疲労 S-T 曲線

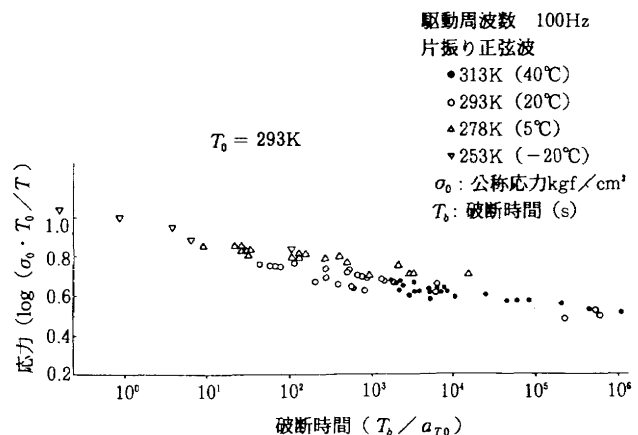


図 8.2 BP-105J 推進薬 (老化後) の高周波疲労 S-T 曲線

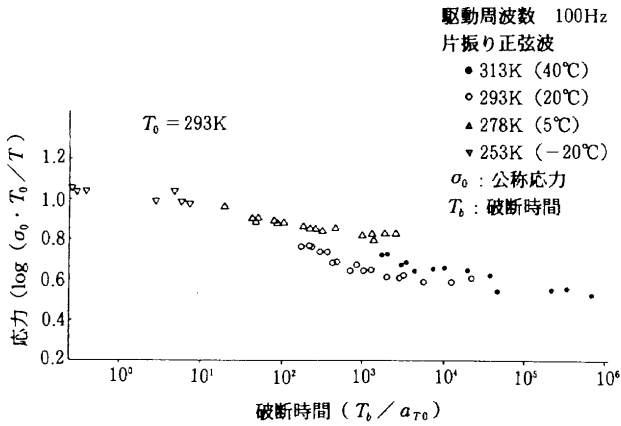


図 8.3 BP-104J 推進薬 (老化前) の高周波疲労 S-T 曲線

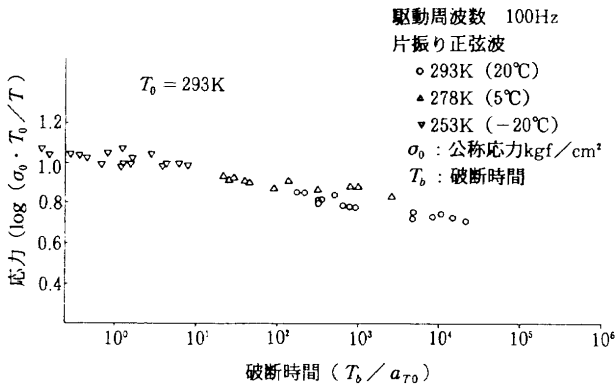


図 8.4 BP-104J 推進薬 (老化後) の高周波疲労 S-T 曲線

化の換算時間への影響は40℃以下ではほとんどないので、通常の常温保管では、図 8.1~図 8.4 について、換算係数の老化による影響を無視しうるのであろう。

8.3 疲労の燃焼速度への影響

これまで述べたような疲労損傷が、推進薬の燃焼速度に及ぼす影響について調べるために、疲労破断後の推進薬試験片を用いて、ストランド燃焼試験を行った。試験方法、装置等は第3章、第5章に述べたとおりである。

比較のために、疲労試験を行った推進薬と同一バッチではないが、同薬種のバージン推進薬のストランド燃焼試験結果を図 8.7 に示す。一方、疲労破断後の推進薬試験片を用いてのストランド燃焼速度測定試験結果をBP-105J については図 8.8 (a)~(c) に示す。(a), (b), (c) は疲労試験時の環境温度がそれぞれ 5℃, 22℃, 40℃であるが、これらの図から、疲労試験時の環境温度の影響は特に認められず、また、図 8.7 のバージン推進薬の場合とも、特に差異は認められない。このことは、図 8.9 に示す BP-104J についても同様である。ここでは環境温度40℃の場合の結果を示すにとどめる。

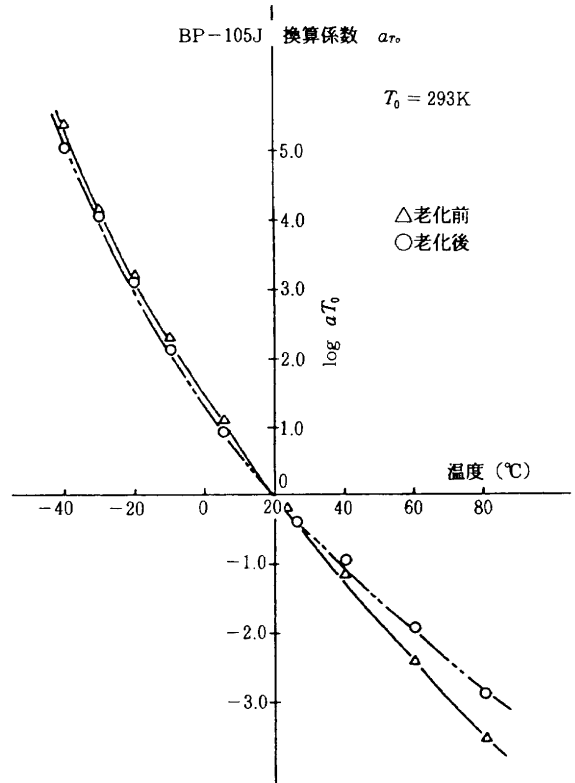


図 8.5 BP-105J 推進薬の老化前後の温度・時間換算曲線

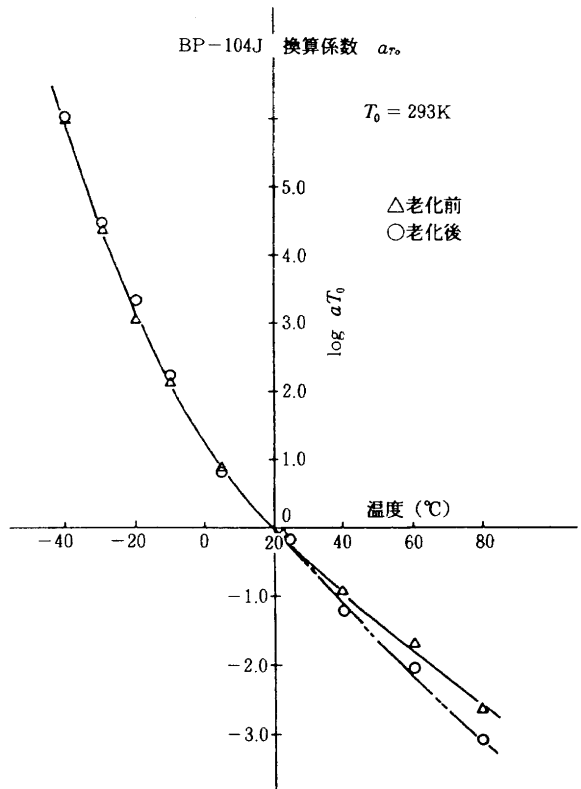


図 8.6 BP-104J 推進薬の老化前後の温度・時間換算曲線

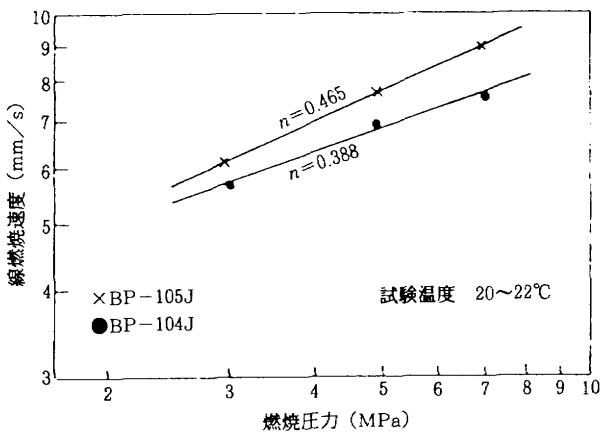


図8.7 国産上段モータ用推進薬のストランド燃焼速度

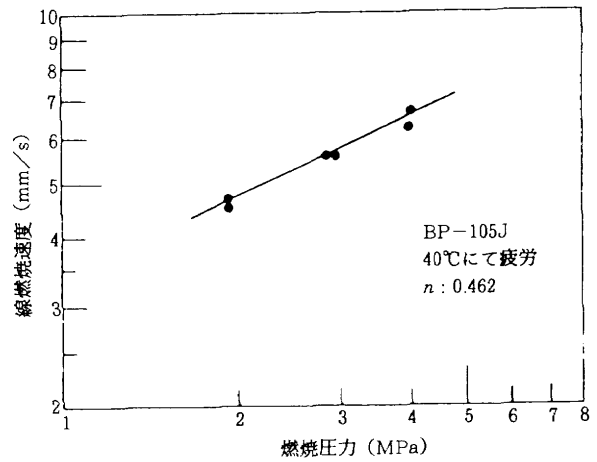


図8.8(c) BP-105J推進薬の環境温度40°Cでの疲労破断試験片によるストランド燃焼速度

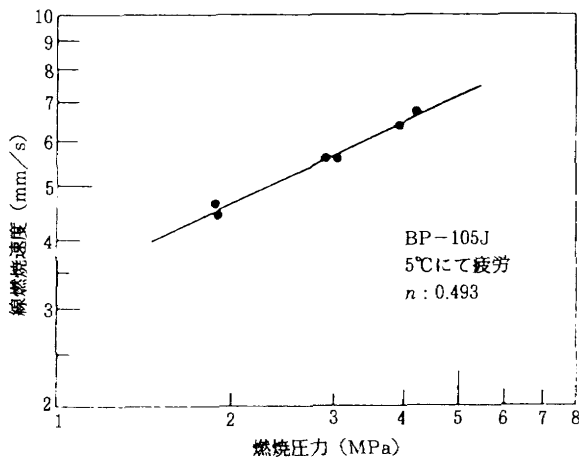


図8.8(a) BP-105J推進薬の環境温度5°Cでの疲労破断試験片によるストランド燃焼速度

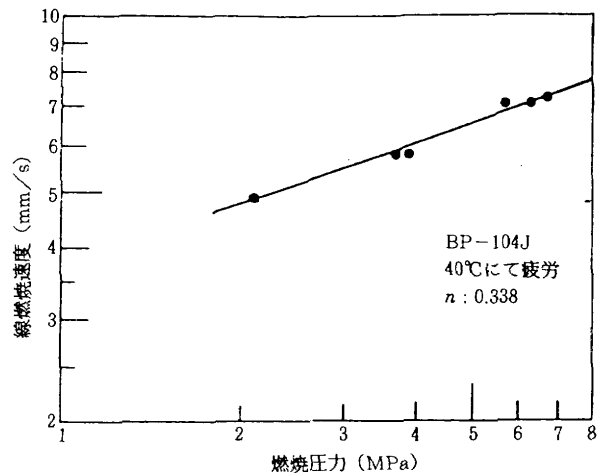


図8.9 BP-104J推進薬の環境温度40°Cでの疲労破断試験片によるストランド燃焼速度

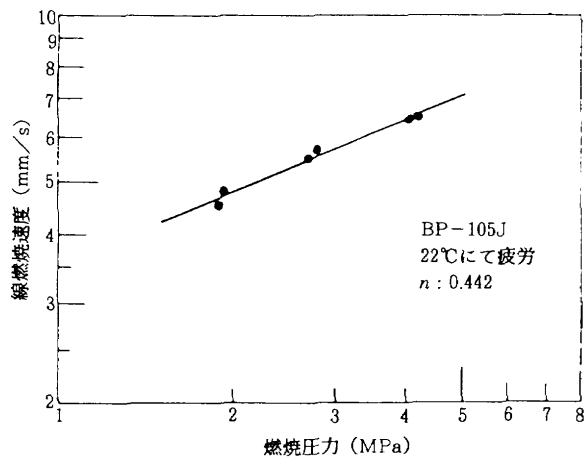


図8.8(b) BP-105J推進薬の環境温度22°Cでの疲労破断試験片によるストランド燃焼速度

8.4 HMX 添加推進薬の疲労特性

ここでは、従来のアポジ・モータ用推進薬 BP-105J と比較しながら、HMX 添加推進薬 BP-109J (表 8.1 参照^{8.1)}) の実験結果について述べる^{8.2), 8.3)}。

図 8.10 に応力波形を示す。入力正弦波であるのに対し、出力応力、波形はまずまずきれいな波形ではあるが、低応力側では波形は丸くなっている。このことは推進薬等の複合ゴム系材料に特有と思われる。BP-105J, BP-105Ji, BP-109J にも共に見られる。その周波数分析結果を図 8.11 に示すが、明白に高調波が認められるのに対し、ゴムシート材では、ほとんど高調波は見られない (図 8.12 参照)。

BP-105J と BP-109J の応力-時間曲線を図 8.13, 図 8.14 に示す。高応力時にはあまり差はないが中応力時には BP-109J の破断時間は比較的短くなっている。また破断後の試験片を取りはずす時、BP-109J の場合はかなり高温となっている印象があったので、試験片の

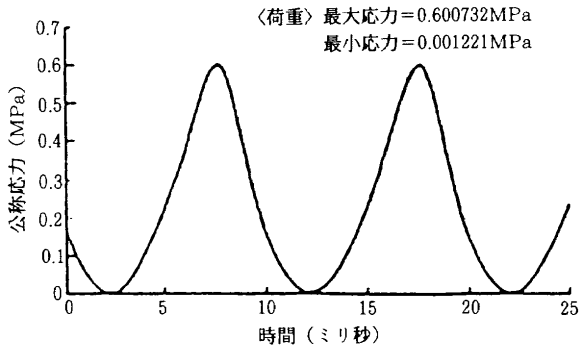


図 8.10 高周波疲労試験機による推進薬試験片の片振り試験時の応力波形 (100Hz)

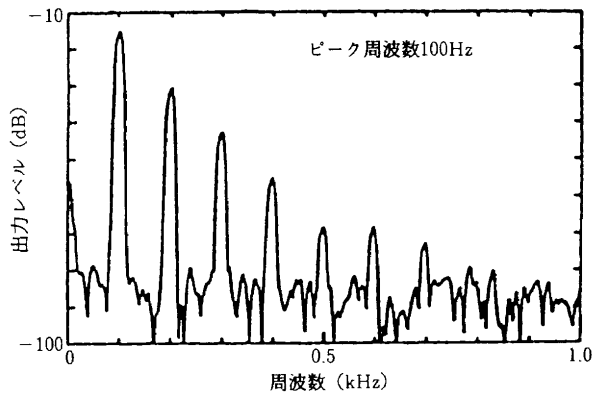


図 8.11 推進薬試験片の応力波形の周波数特性

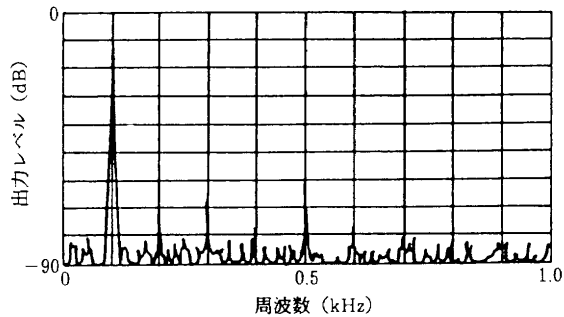


図 8.12 ゴム・シート試験片の応力波形の周波数特性

中央部にφ0.2の銅・コンスタンタン熱電対を埋め込み、疲労試験中の試験片内部の温度上昇による飽和温度を測定したところ、図8.15に示すように、低応力時にはほとんど差がないが、中応力時にはかなり差があった。高応力時については、温度が上昇・飽和する前に熱電対の埋め込み箇所より破断してしまうため、測定不能であった。

以上の結果から、図8.14に示す破断時間の低下傾向は試験片の温度上昇が大きいと推定される。その原因は、これだけの試験でははっきりしないが、HMXを入れた場合に静的物性・強度が低下する傾向があり、これを改善して、BP-109Jの静的物性・強度をBP-105Jと同等以上にするために、可塑剤を増量しすぎたため、

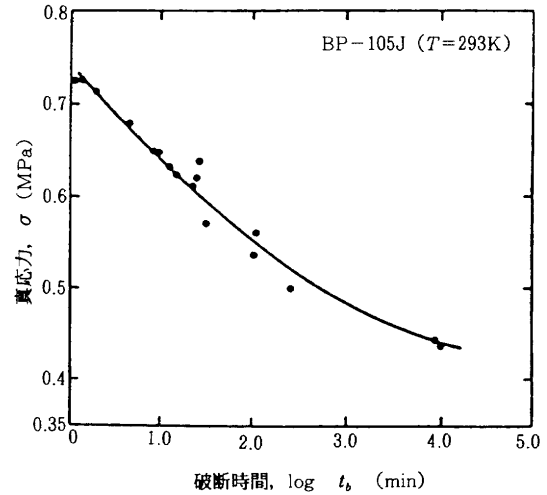


図 8.13 H-I ロケット・アポジモータ用推進薬 (BP-105J) の疲労破壊の応力-時間曲線 (片振り試験)

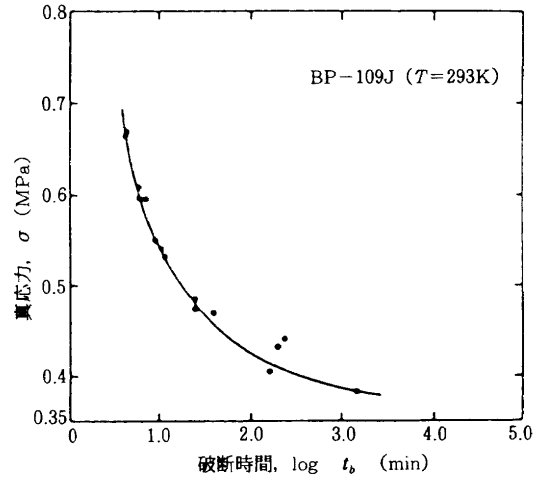


図 8.14 HMX 添加推進薬 (BP-109J) の疲労破壊の応力-時間曲線 (片振り試験)

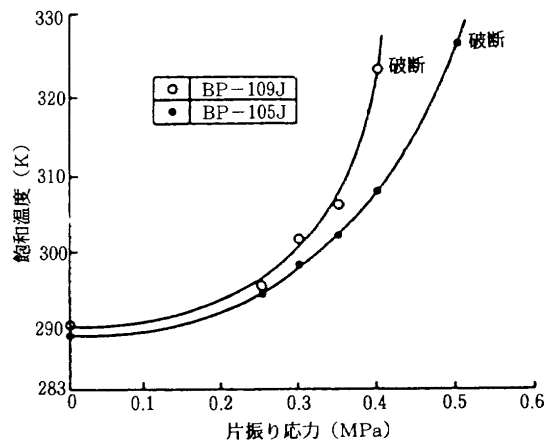


図 8.15 BP-109JとBP-105Jの疲労試験時の飽和温度の比較

動的応力負荷時の応力-変位ループの面積が増大し、温度上昇の増大につながったことが考えられる。今後は、静的、動的負荷条件に対する許容度を総合的に検討し、静的・動的物性・強度を確定することになる。BP-105Jと同等にする必要があるならば、HTPB バインダの硬化剤や可塑剤の配合量の若干の変更にて調整することになった。

また、疲労損傷を受けた推進薬の燃焼特性の変化も気になるところである。そこで、疲労破断した試験片について、その燃焼速度をチムニー型ストランド燃焼速度測定装置にて測定した。その結果を図8.16に示す。データ点数は少ないが、HMX 添加推進薬BP-109Jにおいても、図8.17^{8.1)}に示す疲労損傷のない場合の燃焼速度と比較して、大差のないことが確認された。

これまで述べたように、なされた実験は必ずしも十分とは言えないが、HMX 添加推進薬についても、疲労強度、および疲労損傷の燃焼特性への影響とについて、ほぼ良好な実験結果が得られたと言えよう^{8.4)}。

8.5 まとめ

H-I ロケットの上段モータ用推進薬につき、開発に成功した固体推進薬用高周波疲労試験機により、その疲労試験を各種温度環境下にて行うと共に、疲労試験後

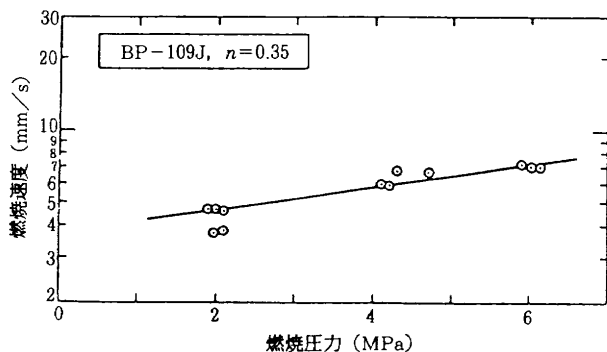


図8.16 BP-109Jの疲労損傷時の燃焼特性

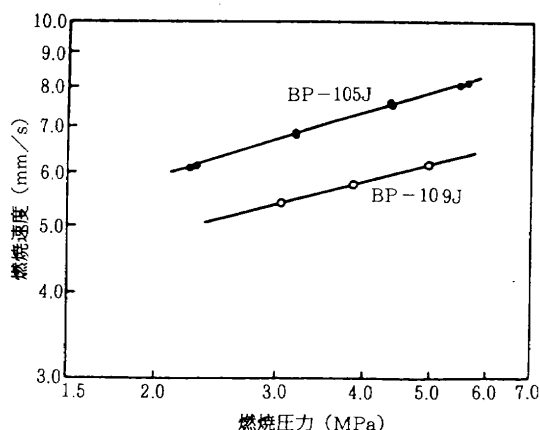


図8.17 両推進薬の燃焼速度の比較

の試験片のストランド燃焼速度の測定を行った。

その結果、これまで得られたことのない、実機で受けるのと同等の周波数での疲労特性および、疲労損傷の燃焼速度への影響についてのデータを従来型推進薬だけでなく、新開発のHMX 添加推進薬についても得ることができた。これらのデータは、H-I ロケットの上段モータの耐振動保証のために不可欠であろう。

8.6 参考文献

- 8.1) HMX推進薬研究会; HMX 添加コンポジット推進薬に関する基礎的研究とその実用化, 航空宇宙技術研究所報告, NAL TR-875, 1985年.
- 8.2) T. Mitani, et al.; Proc. 15th ISTS, Tokyo, 1986, pp. 237-242.
- 8.3) T. Sofue, et al.; Proc. 15th ISTS, Tokyo, 1986, pp. 271-276.
- 8.4) M. Shimizu, et al.; Proc. 16th ISTS, Sapporo, 1988, pp. 183-190.

第9章 推進薬クラック内火炎伝播

9.1 まえがき

推進薬の変形、損傷、破壊の中で、モータとして最も危険と思われるものは破壊である。これまで述べたように、変形、損傷はそれ自体、燃焼特性にそれほど大きな影響を与えることはない。従って、変形、損傷はむしろ、最も危険な破壊の前段階であるとの観点が重要であろう。

しかしながら、固体推進薬は、粒子充填ゴム系複合材料の一種であり、その破壊挙動の解明は容易なことではなく、これまで述べた、変形、損傷、破壊の研究は、未だ極めて不十分であり、破壊クライテリアを精密に確立するにはほど遠い状況である。

従って、ここでは、巨視的破壊が発生した場合の燃焼への影響について調べることにした。すなわち、推進薬に模擬クラックを設け、これを燃焼試験することにより、火炎のクラック内への伝播条件を調べた。これは、たとえクラックが発生していても、クラック内に火炎が伝播しなければ、全く問題はないが、もし、クラック内に火炎伝播すると、モータの爆発にもつながるので、クラック内火炎伝播条件を、国産開発中のアポジ・モータ用推進薬に対して確立しておくことは、極めて重要であると考えられたからである。

推進薬内火炎伝播の研究は、五代によって1960年代に重要研究分野として確立された^{9.1)}。その後、米国の K. K. Kuo 等により精力的な研究が今日まで続けられており、クラック内火炎伝播、着火、クラック内圧力波の挙動とそれによる推進薬変形の有限要素法による研究等が行われている^{9.2)-9.4)}。ただし、これらの研究は、クラック

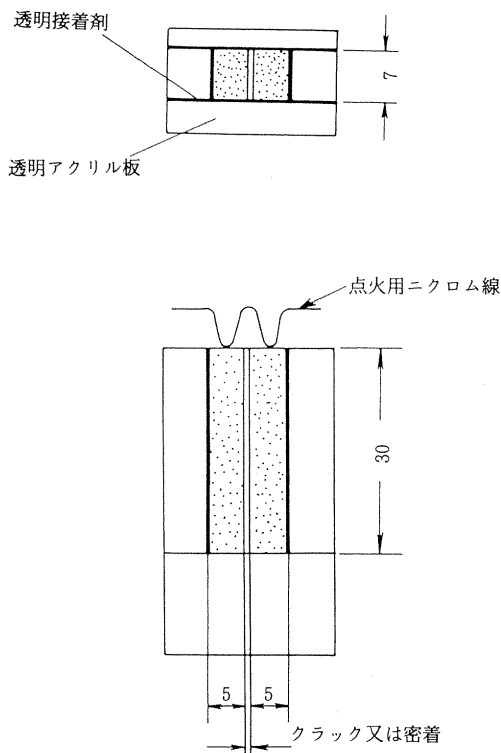


図9.1 推進薬クラック内火炎伝播条件測定用推進薬試験片

クの開口変位が1 mm 前後の場合が多く、確実に火炎伝播を生ずる場合を主に対象としている。

しかしながら、モータにおいて、クラック内火炎伝播が発生すれば、クラックはさらに進展する危険性も大きく^{9.1)}、そうでなくとも、クラック内の急激な燃焼現象により、モータ破壊の危険性が大きい。従って、国産開発中のアポジ・モータの信頼性確保のためには、実用推進薬によるクラック内火炎伝播条件の明確化が重要となる。

9.2 クラック内火炎伝播条件測定実験法

クラック内への火炎伝播条件を測定するために、図9.1に示すように、推進薬の角材2本をアクリル板にはさんで接着した試験片を製作した。推進薬角材は特殊な切断治具により切り出されており、その表面では酸化剤粒子も切断されているので、その表面は極めて平滑である。このような高精度な角材をクラックを模擬するために0.01–0.1mmの間隔に設定してアクリル板に接着し、その間隔は工具顕微鏡にて0.001mmの精度で測定される。この試験片の上部に点火用ニクロム線にて点火し、模擬クラックへの火炎伝播を光学的に測定する方法を採用している。

試験片は、第3章で述べたチムニー型ストランド燃焼速度測定装置にて燃焼試験を行うため、図9.2に示すように、ホルダ上に取付けられ、点火用ニクロム線も設置

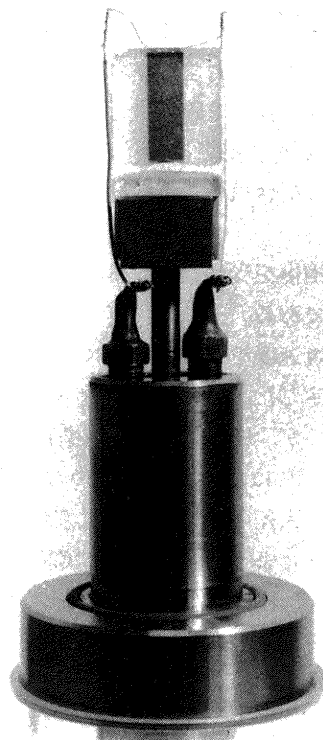


図9.2 チムニー型ストランド燃焼装置のホルダに取付けられた推進薬クラック内火炎伝播測定用試験片

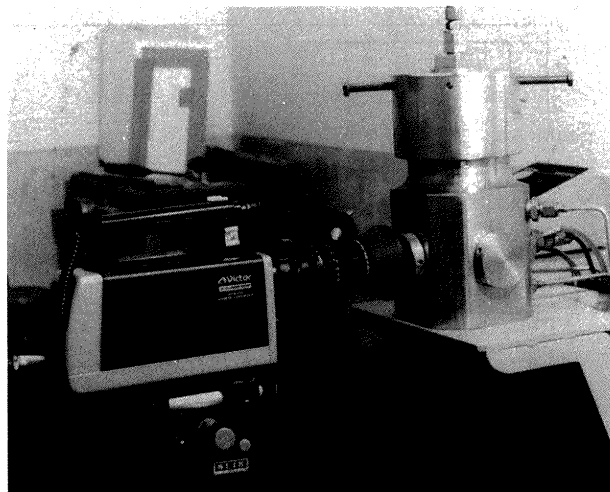


図9.3 チムニー型ストランド燃焼装置と燃焼状況観測用TVカメラ

された。そして、その燃焼状況は図9.3に示すようにストランド装置の側面の光学窓からTVカメラにて観測され、図9.4に示すビデオレコーダ、画像解析装置にて記録、解析される。この詳細は第3章と同様である。

9.3 実験結果

供試推進薬種として国産開発のアポジ・モータ用BP-



図9.4 燃焼状況観測用TV装置

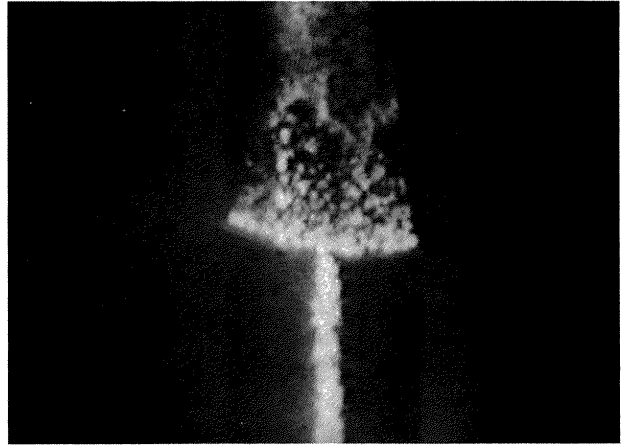


図9.6 クラック内火炎伝播状況 (燃焼圧力4.9MPa, クラック幅0.02mm)

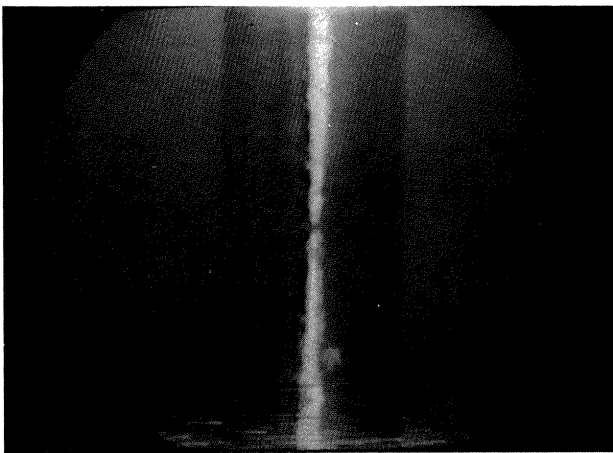


図9.5 クラック内火炎伝播状況 (燃焼圧力4.9MPa, クラック幅0.03mm)

105Jを採用し、得られた結果について述べる。図9.5は燃焼圧力4.9MPa, クラック幅0.03mmの場合で、点火直後にクラック内に火炎伝播している。また、図9.6には、試験片の燃焼途中まで、クラック内火炎伝播しなかったが、燃焼途中で火炎伝播を発生しためずらしい例を示す。この場合の燃焼圧力変動を図9.7に示す。ストランド装置の設定圧力3.7MPaとし、圧力がほぼ一定となったところで試験片上部に点火する。燃焼ガス発生によりストランド内圧は4.7MPaに上昇し、そこでほぼ一定となるが、点火2秒後にクラック内火炎伝播し、燃焼面積の増大等により、燃焼圧力は5.6MPaのピーク圧力を示して後、推進薬が燃え尽きて圧力は設定圧力3.7MPaに復帰している。

このような方法で、燃焼圧力とクラック幅を種々に変化させて、クラック内火炎伝播のクラック幅と燃焼圧力との関係についての多数の実験を行った。その結果、図9.8に示すように、クラック内火炎伝播の限界線は、ク

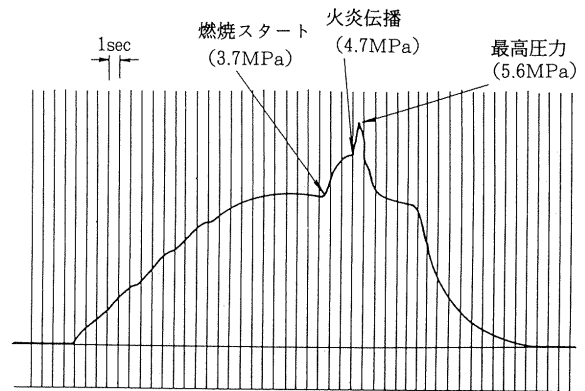


図9.7 推進薬クラック内火炎伝播条件測定試験における圧力曲線 (図9.6の場合)

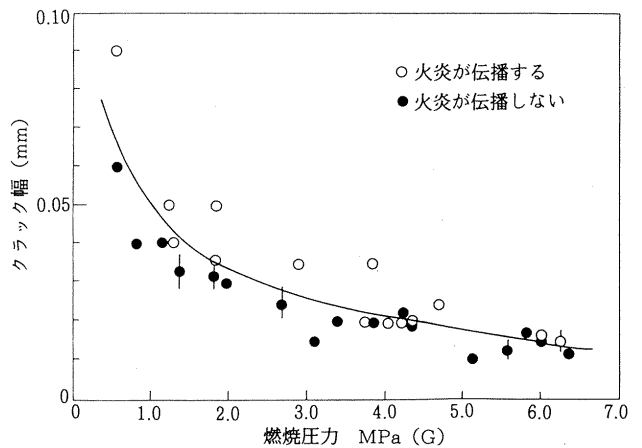


図9.8 BP-105J 推進薬のクラック内火炎伝播限界線

ラック幅 l_c と燃焼圧力 P のと間で

$$l_c \propto P^{-1/2}$$

に近い関係が得られた。その結果、実機アポジ・モータにクラックが発見された場合、点火後の推進薬に作用する種々の荷重によるクラック開口幅を有限要素法等にて

計算し、その幅が、設定された燃焼圧力において、図9.8の限界線の上下どちらに来るかにより、クラック内火炎伝播が発生するかどうかを判定することができる。従って、本図は、実機モータにおいて最もクリティカルな問題の1つであるクラック内火炎伝播について、その信頼性評価に直接適用しうる極めて重要なデータと言えよう。

9.4 推進薬クラック内の圧力変動

これまで、クラック内火炎伝播条件の測定において、燃焼圧力としてはストランド装置内圧を測定してきた。しかし、0.02~0.1mmという狭いクラック幅の場合、火炎伝播の動的挙動が問題となろう。特にクラック内圧力の変動は、クラックの進展の原因ともなりうる^{9.5)}。もし、クラック進展が生ずれば、実機モータの場合、たとえ、初期クラックが極めて小さく、火炎伝播が発生しても安全と考えられる場合にも、ほとんど致命的となりうる。従って、クラック内圧力変動を調べておく必要がある。

このような目的のために、図9.9に示すような片面が推進薬、他面をアクリル板とする試験片を製作し、そのアクリル板に圧力計を設置して、推進薬・アクリル板間に火炎伝播した場合の圧力変動を測定した。試験片は、特別の加圧チャンバ内にて燃焼試験されるが(図9.10)、その燃焼状況は、やはり光学窓より観測される。

実験結果の一例を図9.11に示す。チャンバ圧とクラック内圧を比較すると、点火直後の圧力上昇期以外はほとんど同様の変動を示していると言える。点火直後の圧力上昇期には、チャンバ圧は滑らかに上昇しているのに対し、クラック内圧は、極めてはげしい圧力振動を示しており、その最高圧力は約3.5MPaにも達している。圧力振動がおさまった後の最高圧力は2.4MPa、点火前圧は0.65

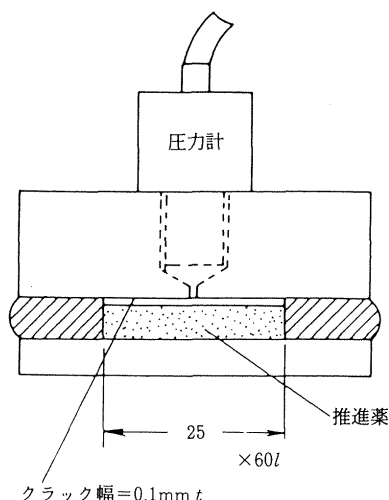


図9.9 推進薬クラック内火炎伝播時のクラック内圧測定用推進薬試験片

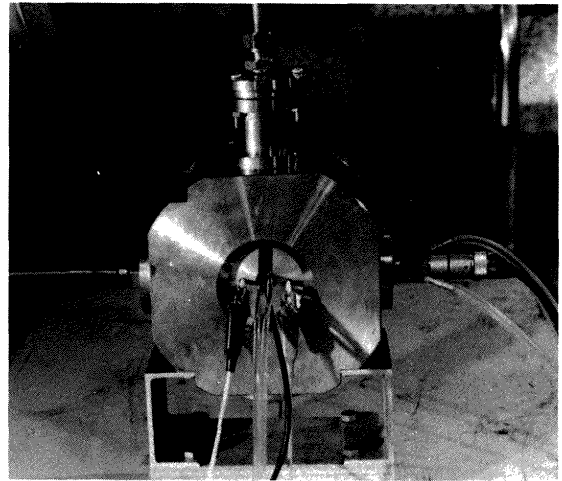


図9.10 推進薬クラック内火炎伝播試験用加圧チャンバ

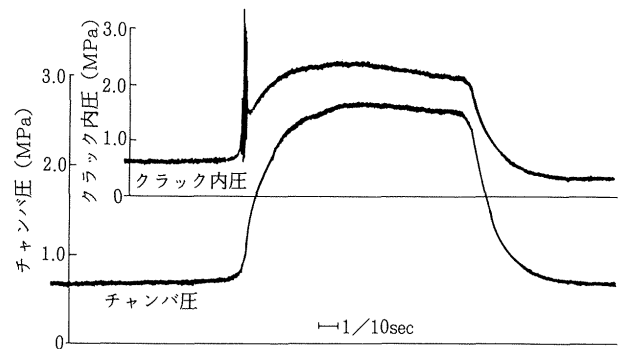


図9.11 推進薬クラック内火炎伝播時のチャンバ圧とクラック内圧との比較

MPaであることから、振動圧力時の最高圧力は、通常のクラック内最高圧力と比較して、約2倍近い圧力上昇量となっている。このことから、この圧力振動がクラック進展の原因となりうるものが心配される。圧力振動は0.5秒程度で停止しており、クラック幅の比較的狭い場合に発生している。このような条件下でクラック進展の力学的条件についての研究が今後の課題となろう。ここでは、すでに得た推進薬の疲労強度のみでなく、クラック先端の応力条件、歪条件、さらにそれらの動的な破壊条件の確立が必要であるが、静的なクラック進展条件でさえ大変形等のため確立が困難である現状では、動的破壊条件の確立は極めて困難である。ただし、そのための方向としては、クラック先端部の振動圧力による動的挙動を有限要素法等にて解析し、その結果とすでに得られた疲労試験結果とを比較して判定する方法を採ることになるだろうが、ここでも第5章~第8章で得られた疲労試験データは重要であろう。

9.5 まとめ

固体推進薬の破壊の燃焼への影響の研究の一つとして、

モータにとって最も危険と思われるクラック発生を想定し、国産開発のH-Iアポジ・モータ用推進薬の模擬クラック内火炎伝播条件の測定とクラック内圧力の変動の測定を行い、次の結論を得た。

- (1) クラック内火炎伝播の燃焼圧力とクラック幅との限界線を得た。これは、実機の推進薬クラックにおける信頼性評価に直接適用できる。
- (2) クラック内圧力測定試験により、クラック内火炎伝播の初期に激しい圧力振動の発生する危険のあることがわかった。その圧力振動データは、燃焼中のクラック進展の評価に適用できる。

9.6 参考文献

- 9.1) 五代富文；固体プロペラントの割れ目への火炎伝播 (I), 航空宇宙技術研究所報告書, NAL TR-91, 昭和40年7月.
- 9.2) K. K. Kuo, et al.; Combustion Process in Solid Propellant Cracks, Naval Weapons Center, NWC TP 6278, June 1981. AD A116796.
- 9.3) K. K. Kuo, et al.; Propellant Crack Tip Ignition and Propagation under Rapid Pressurization, Office of Naval Research Power Program, Contract No. N00014-79-C-0762.
- 9.4) K. Kim; Parametric Study of Propellant Crack Combustion, Naval Surface Weapons Center, NSWC TR 79-485, Oct. 1981, AD A108769.
- 9.5) J. Mantzaras, et al.; Different Modes of Crack Propagation in Burning Solid Propellants, AIAA Paper, AIAA-85-1176.

第10章 結論

固体推進薬は製造から燃焼までの間に、自重、振動、熱応力等により変形し、強度的には損傷を受け、さらには破壊にいたる。そして、これらの変形・損傷・破壊により燃焼はどのような影響を受けるかが、固体モータの信頼性確保のために問題となる。ここでは、推進薬の破壊過程を巨視的、微視的に明らかにすると共に、米国で

考案されたチムニー式燃焼速度測定装置の製作、世界で初めての本格的な推進薬用疲労試験機の開発とそれによる各種試験をH-Iアポジ・モータ用推進薬および第3段モータ用推進薬について行い、推進薬の変形・損傷・破壊と燃焼の関係を明らかにした。その中で特筆すべきことは、疲労強度試験を実機モータの推進薬の受ける振動周波数と同等の比較的高い周波数にて行ったことである。このために、疲労試験機に超小型動電型加振器を組込む等の工夫を要したが、その結果、上段モータの開発陣の予想を裏切り、クリープより疲労の方が同じ応力レベルでははるかに危険であることがわかった。従って、固体推進薬の今後の強度評価のためには、これまで行われてきた引張試験、クリープ試験、応力緩和試験等の静的試験に加えて、動的試験である疲労試験が不可欠と考えられるに至った。このことは、単に上段モータや、衛星の耐振動保証のためだけでなく、H-II・SRBの推進薬についても考慮すべきことであろう。さらに、使い捨て型ロケットの部材の多くは、使用時間が短いことを理由に疲労の問題を重視していないが、今後は高応力振動に伴う低サイクル疲労についても、全般的に見直しを迫られることも予想される。宇宙用材料には新材料が多く採用されているが、その多くは信頼性試験データが十分ではないのが一般的である。その中でも経費、時間ともに負担の重い疲労試験は敬遠されがちであるが、今後は有人ミッション等から見て、より高信頼性が要求されるだけに、疲労の問題も見直されるべきであろう。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始変わらぬ御指導、御鞭撻を賜った航空宇宙技術研究所・長洲秀夫・科学研究官(後に所長)、興石肇・宇宙研究グループ総合研究官、宇宙開発事団・竹中幸彦理事、望月昌・総括開発部員、植崎哲二・角田ロケット開発センター所長に対し深く感謝いたします。更に、日産自動車(株)の川島隆・技術部長、日本油脂(株)の福田孝明・技師長をはじめ、関係者の皆様には多大な御支援御協力を戴きましたことに厚く感謝いたします。(尚、肩書きは共同研究実施当時の肩書きとさせていただきます。)

航空宇宙技術研究所報告1297号

平成8年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 千182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
