

ISSN 0452-2982
UDC 620.1.05:
620.186:
629.76

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-449

固体推進薬破壊過程微細観測機の試作

清水盛生・種村利春・伊藤克弥
藤原 勉・五代富文

1981年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

固体推進薬破壊過程微細観測機の試作*

清水 盛生** 種村 利春** 伊藤 克弥**

藤原 勉** 五代 富文**

概要

団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。宇宙用に広く用いられる複合固体推進薬は、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り、その破壊基準の確立のためには、特にその破壊過程の微細な研究が必要となる。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装置を試作した結果について報告する。

1. まえがき

現在、宇宙用固体ロケット用の推進薬としては、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不均一部分、気泡等の欠陥が存在し、そこからき裂等の破壊が生じると、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。そのため、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し、信頼性設計の基礎データとしなければならない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Wiegand²⁾、Bills³⁾、河田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

と考えられている。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、さらにはそれらの温度・時間依存性に関しては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を行なった結果について報告する。

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おいて観測するためのものであるから、引張試験機、恒温槽、光学顕微鏡の基本3部分より構成される。設計方針としては、この3部分について広範囲な市販品調査を行ない、本機がシステムとして最良の機能・性能を発揮できるような改造が可能であり、かつその改造が最少である製品を選定する。これらに必要な改造を行ない、システムとして完成させるという方針を採った。

* 昭和56年8月19日受付

** 宇宙研究グループ

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、引張試験機部としては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、電子速度制御式引張試験機（例えば、インストロン、オートグラフ等）が最適であろうが、これは一般に大型かつ極めて高価である。複合固体推進薬の抗張力は温度 20°C では $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下、 -40°C でも $40\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であり、金属（ないし構造材）試験機（荷重容量 $1\sim 20\text{ton}$ ）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

るくらいはあるが、他に適当なものが見当たらないので、高分子単繊維用電子速度制御式小型引張試験機 UTM-II（東洋測器（株）製、最大荷重 5kg 、引張速度 $2\sim 40\text{mm}/\text{min}$ ）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程度の速度で下方に移動するため、顕微鏡による追跡が困難である。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 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

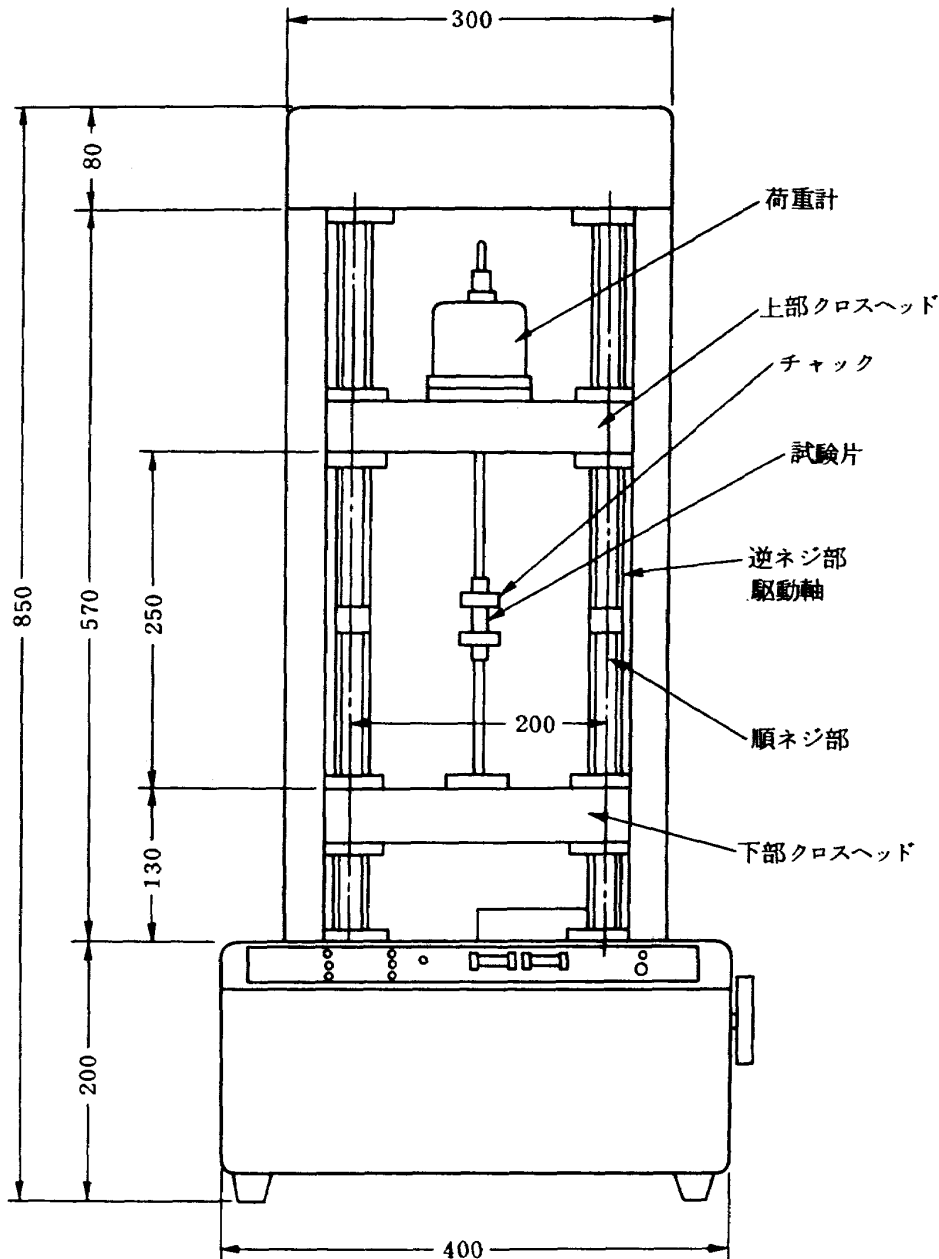


図 1 引張試験機部

機部の主要仕様を表1に示す。

なお、本試験機を用いて、低温環境下での比較的高速の伸長試験を行なった場合、荷重計の容量が不足しがちであった。本試験機の駆動系、構造系には容量的余裕があるので、荷重計を5kgから20kgに

表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 5 kg
ストローク	有効 50mm(片側クロスヘッド)
ストローク 表示目盛	最小 0.05mm, 最大 200mm
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	5kg用, 1kg用(80g兼用)
駆動モータ	同期モータ 10W
電 源	AC100V 50~60 c/s
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 (5kg) TBL-1LF-II (1kg) TLU-0.08LF-II (80g)
ゲージ抵抗	350Ω
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 50~60 c/s

容量拡大した。

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、高分子特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ある末端水酸基化ポリブタジエン(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。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⁶⁾の低温装置が、その形状・性能仕様の一部変更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にその構成を、また図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)

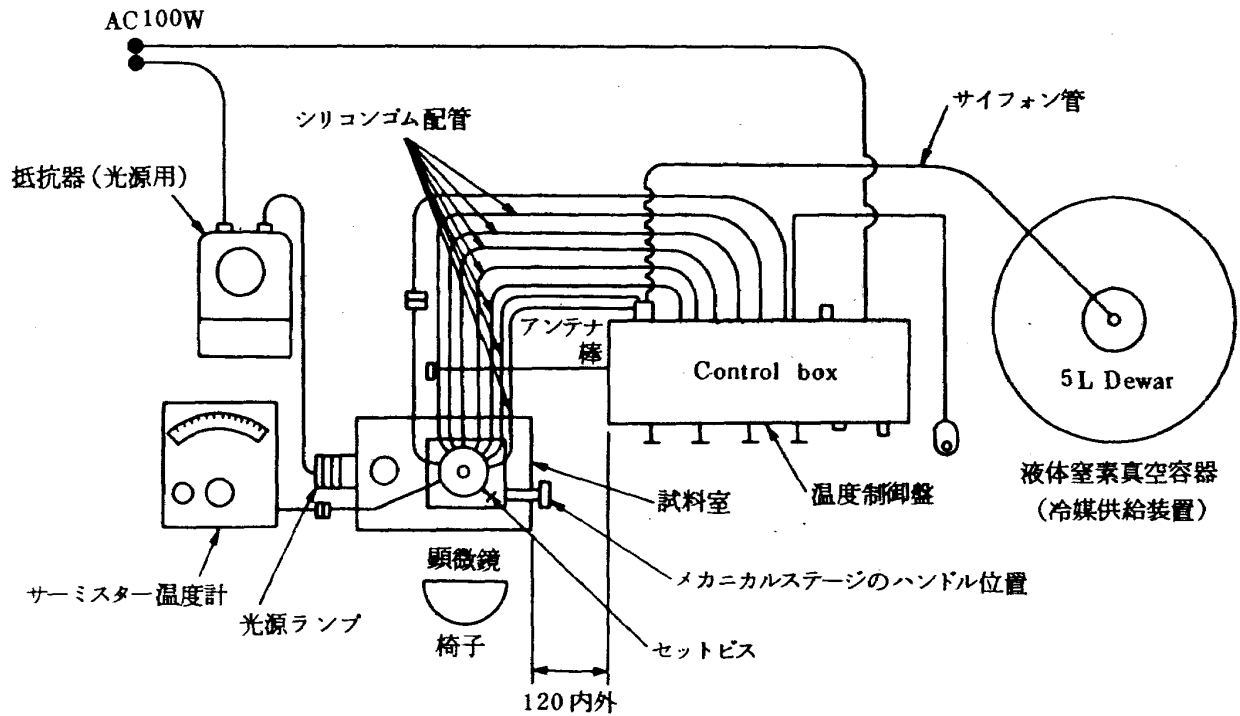


図2 ニコン低温顕微鏡 NE 型の構成

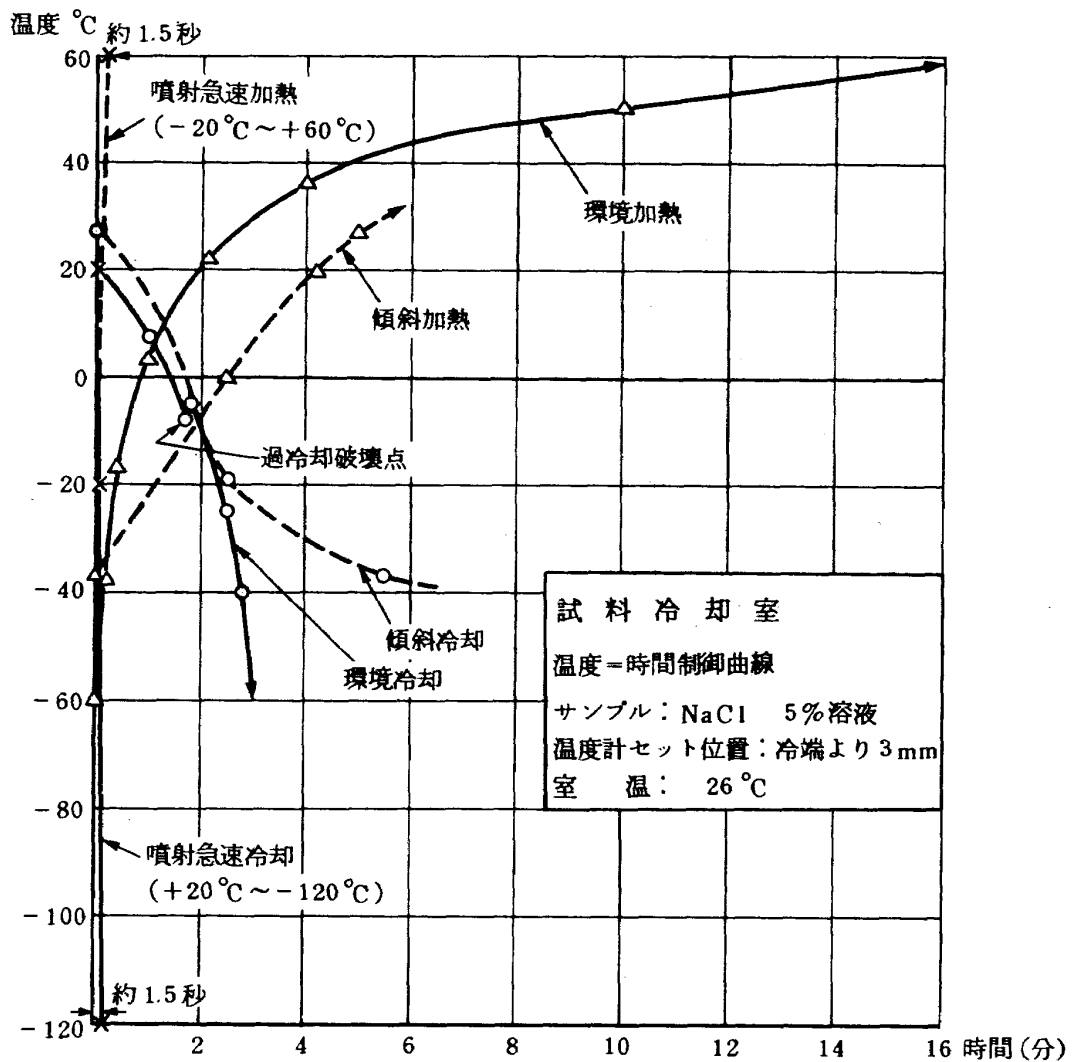


図3 ニコン低温顕微鏡 NE 型性能表

(3) 温度制御範囲が広い。

- 温度範囲 - 120℃～+ 60℃
- 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・永結防止機構付

試料冷却室の観測窓・照明窓には外気を完全に遮断する特殊窒素ガスカート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、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4に示すように、直径φ80、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5に改造された恒温槽を示す。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、試験能率上ほぼ満足できよう。

温度制御系は、図2に示すものと同様であるが、10ℓに容量倍増されたデュワー瓶内の液体窒素は、サイフォン装置により温度コントロール・ボ

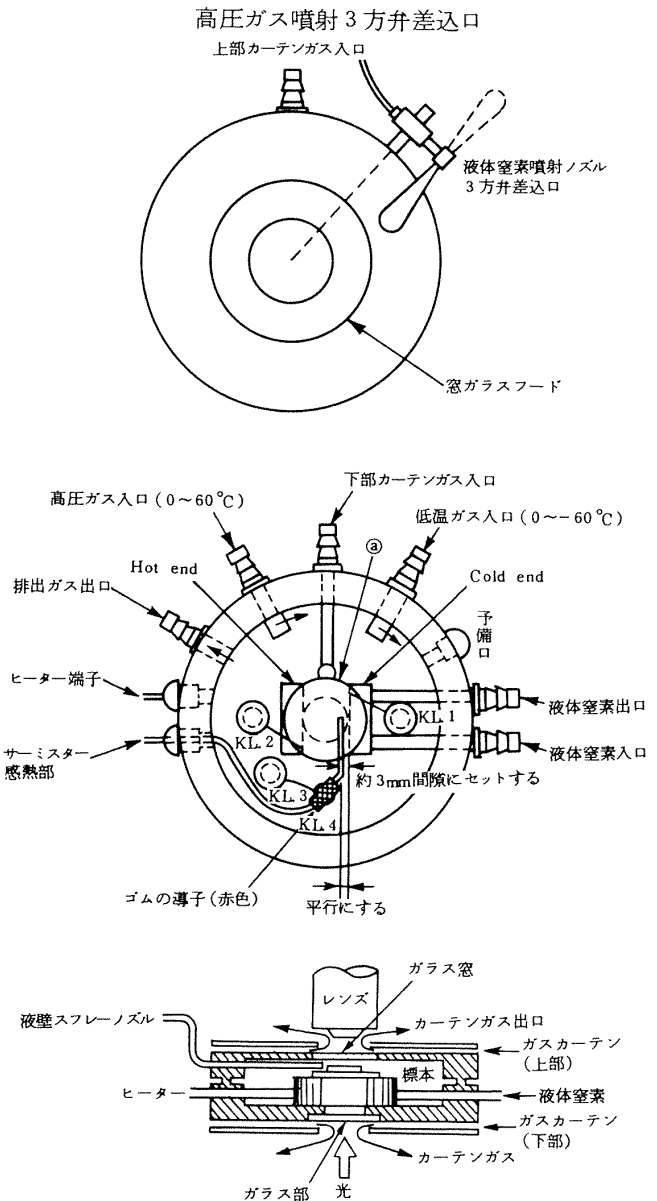


図4 ニコン低温顕微鏡の試料室

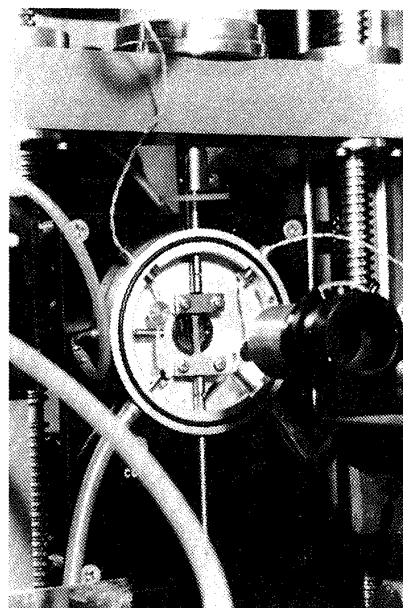


図5 恒温槽の構造とチャック・試験片

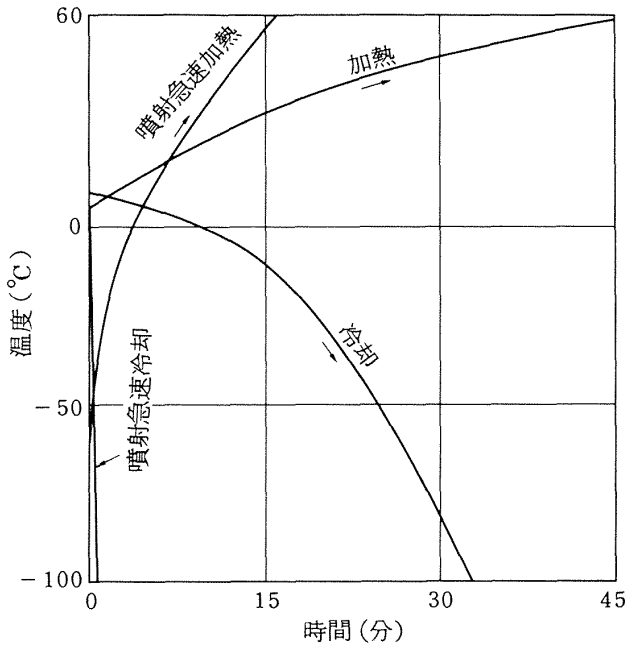


図6 本観測機用改造恒温槽の温度制御特性 (噴射急速加熱・冷却は加熱・冷却用ガスを直接資料に噴射した場合の特性を示す。)

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7に低温試験中の観測・照明窓のくもりのない状況を示しておく。

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8に示すような形状寸法が推薬物性懇談会に提案されており、これはJANAF*で採用しているものほとんど同一である。一方、顕微鏡観測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懇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、試験片の一边がその10倍となる寸法を下限として、図8の寸法

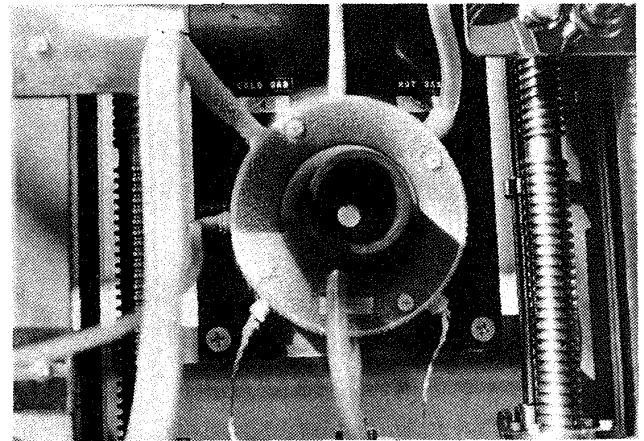


図7 低温試験中の光学窓

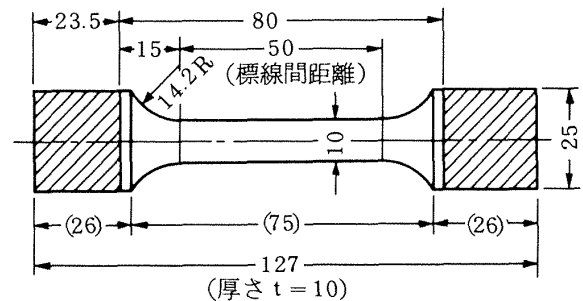


図8 物懇型試験片寸法 (厚さ t = 10)

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、推力大きさ制御型(TMC)固体ロケット用推進薬RS-1105⁵⁾とを採用した(表2参照)。使用した試験機は定引張速度型引張試験機TOM200B(新

表2 供試推進薬の組成

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

* Joint Army - Navy - Air Force Panel on Physical Properties on Solid Propellants.

表3 固体推進薬の物性・強度に関する試験片寸法効果

試験片 特性	1/1BP-17	3/10BP-17	1/1RS-1105	3/10RS-1105
最大応力 (σ_m)	4.3 ± 0.1 (kg/cm ²)	3.7 ± 0.2 (kg/cm ²)	7.8 ± 0.3 (kg/cm ²)	6.5 ± 0.2 (kg/cm ²)
破断応力 (δ_b)	3.4 ± 0.2 (kg/cm ²)	3.2 ± 0.2 (kg/cm ²)	7.5 ± 0.3 (kg/cm ²)	6.0 ± 0.2 (kg/cm ²)
最大応力時の伸び (l_m)	40.6 ± 2.1 (mm)	45.8 ± 2.7 (mm)	24.8 ± 2.0 (mm)	43.8 ± 2.4 (mm)
破断時の伸び (l_b)	85.4 ± 5.3 (mm)	76.8 ± 3.8 (mm)	61.4 ± 7.2 (mm)	83.2 ± 2.7 (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×10/3により表示している。

興通信工業(株)製)に、エア・チャック(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3に示す。両薬種とも、応力は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。そこで、顕微鏡観測には小型試験片が扱いやすい、(引張試験機は小型・安価なもので十分であり、恒温槽は顕微鏡用の一部改造ですむので、特に開発しなくても良い等。)ので、3/10試験片を採用することにした。

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適當である。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信うと、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9に表すように、得られない。つまり、光学的なSN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観測光路と照明光路を鏡胴内で分離する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、光源としてクセノン管を採用し、写真のストロボ撮影により鮮明な映像が得られた(図9参照)

また、破壊挙動観測に際しては、被観測部の光学系による追跡が必要である。光学系は図10に示すように3軸方向に手動により駆動できる基台に組付けられており、被観測部を手動追跡する方式となっている。この方式では低速追跡は容易であるが、比較的高速の伸長試験において高倍率の観測を行なう

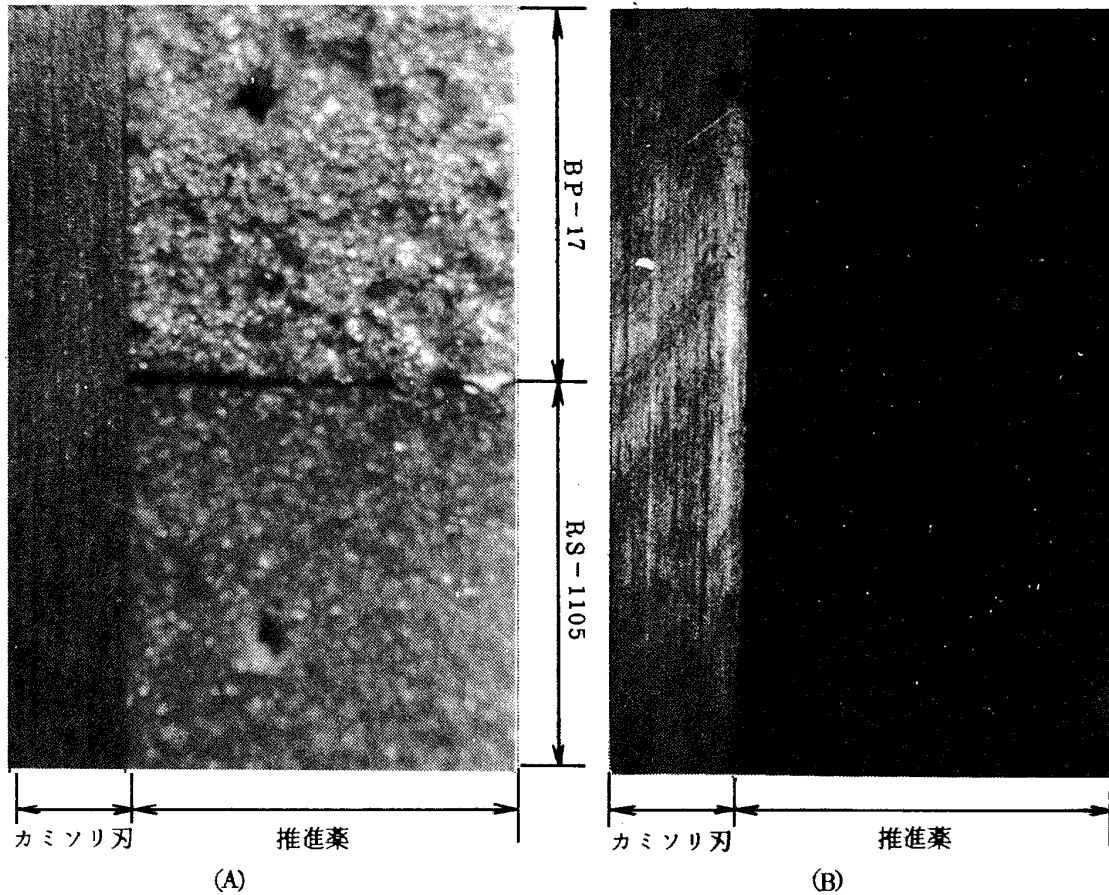


図9 照明法による顕微鏡観察像の差異 (A): 斜光照明法, (B): 落射明視野照明法)

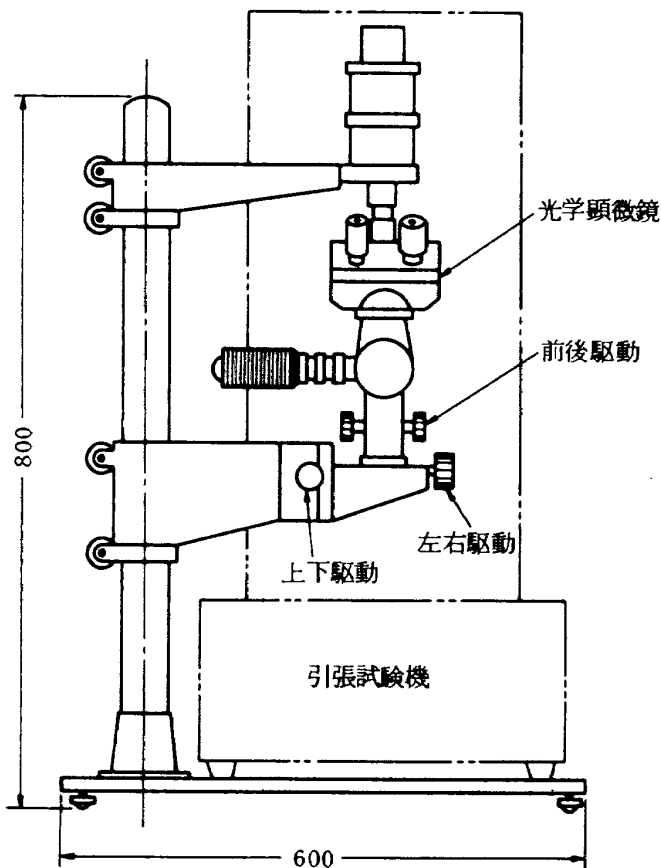


図10 光学系駆動基台

場合には、被観測部の追跡速度が3軸とも比較的高速となり、手動追跡に熟練を要する。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となる。この場合には、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ク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(15V150W)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・カメラとク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、その対物レンズは恒温槽中の資料にあまり近づくことはできないので、作動距離の長いものを用意して

いる。

2.5 防振対策

光学系は xyz 3 軸方向に手動による駆動可能な駆動基台に組付けられているが、その基台上に引張試験機が据えられている。(図 10 参照)。このような装置により試験する場合、引張試験機内部に 10 W 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 10 に示すように、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。

3. 試作結果

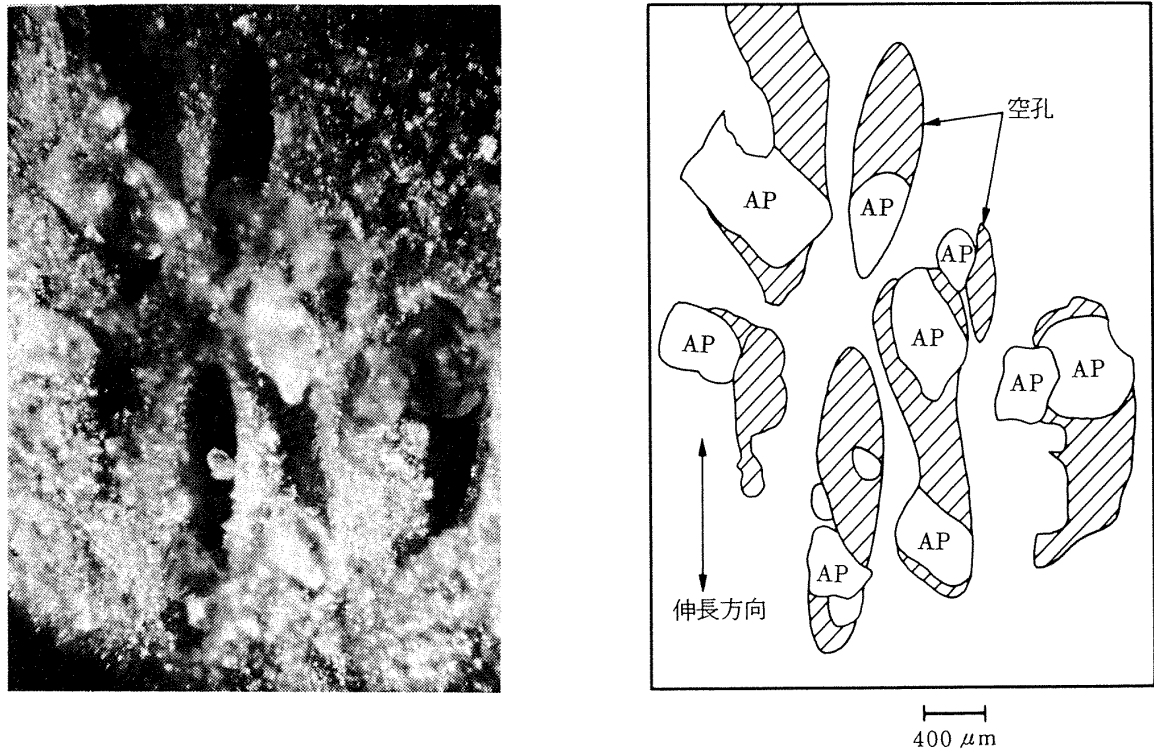
前述のような設計方針に基づき、図 11 に示すような観測機を試作し、複合固体推進薬の破壊過程の観測を行なった。図 12 には、BP-17 推進薬の応力緩和試験時の微細破壊状況を示す。充填酸化剤粒子 (AP 粒子) の伸長方向両極の応力集中部の粒子・粘結剤間に発生した剥離による空孔が伸長方向に成長している状況を図 12 (a), (b) に示す。また、図 12 (c) には、き裂先端部の歪集中による空孔の過度の成長のために、粘結剤形状が鐘乳洞中の鐘乳石柱のような形状となり、粘結剤を構成する高分子鎖が伸長方向に伸び切り、整列する状態となることに伴う白化現象を呈している状況を示す。

また、図 13 には、BP-17 の定速伸長試験における大粒周辺の剥離挙動の観測中に、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、はるかにはなれた内部欠陥部 (非人工的) から発生した主き裂が伝播する状況を好運にも撮影した (顕微鏡の視野は極めてせまいので、そこを非人工的欠陥部よりの主き裂が通過する確率は極めて小さい。) もので、図 12 と同様に、粒子の引張方向両極の応力集中部⁷⁾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撮えたものと言えよう。

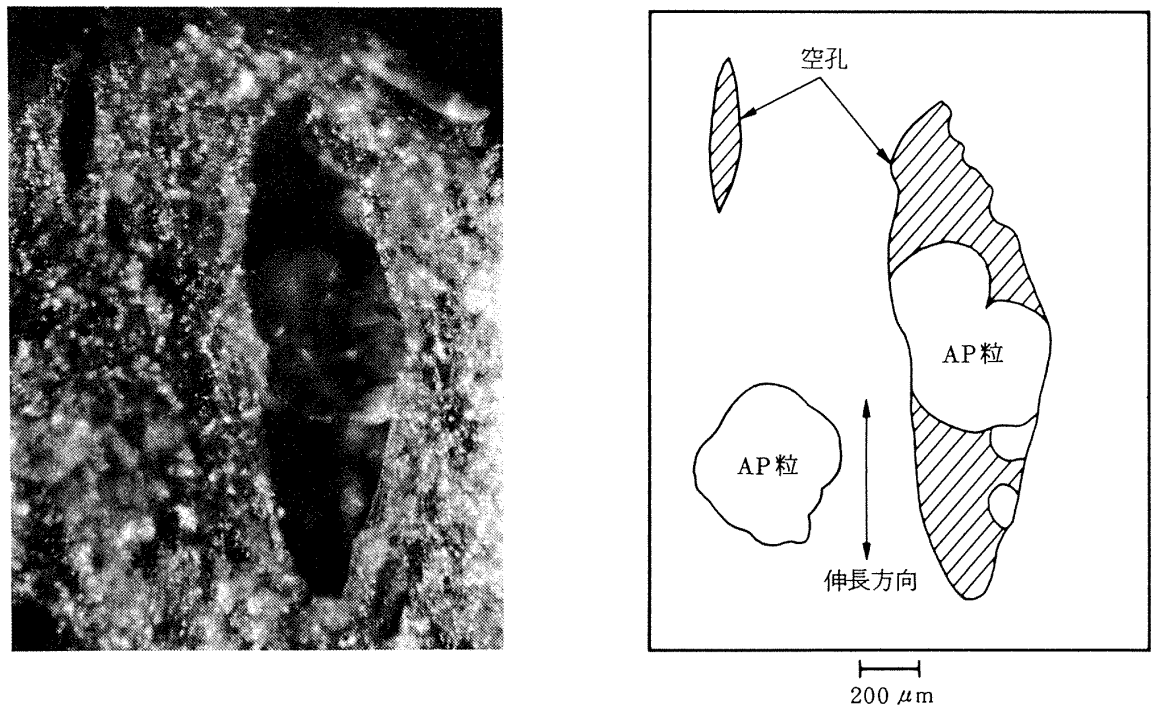
一方、RS-1105 推進薬については、その充填粒子が $10\ \mu\text{m}$ 程度と極めて細かいため、本観測機では粒子・粘結剤間剥離の観測は困難であった。すなわち、充填粒子観測に適する倍率にまで顕微鏡の倍率を上げると、焦点深度が極めて浅くなり、粒子全体像を撮えることが困難となる。また、伸長時の試験片の顕微撮光軸方向の変形 (ポアソン比の大きい高分子粘結剤を含む推進薬の大変形時には、この変形量はかなり大きい。) により、焦点ずれが生ずるが、焦点深度の浅い場合にはこの調節が困難となる。従って、RS-1105 推進薬の場合には、高倍率かつ焦点深度の深い観測系の適用が期待される。ところで、BP-17 推進薬の場合には、光学顕微鏡の倍率・焦点深度は十分かということ、決してそうではなく、かろうじて、観測可能と言うべきであり、RS-1105 推進薬と同様、焦点深度のより深い観測系 (例えば電子顕微鏡等) の適用が期待される。



図 11 固体推進薬破壊過程微細観測機の全体写真

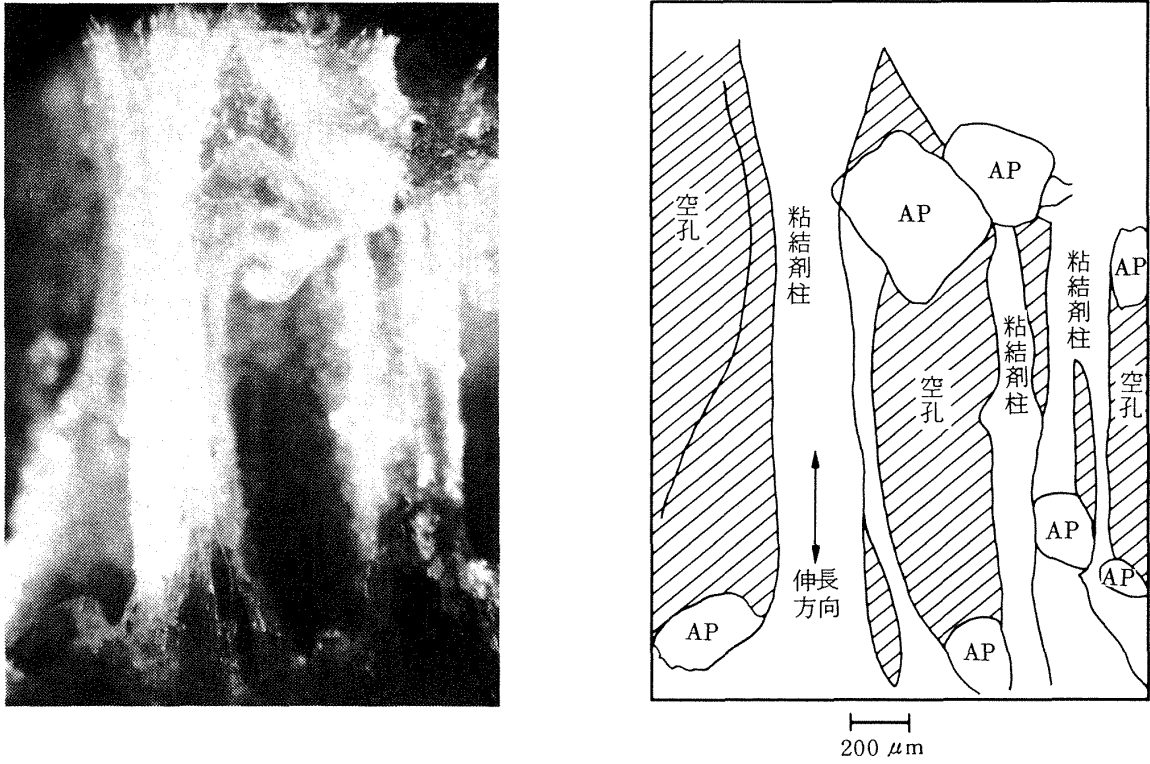


(a) 空孔群の発生・成長



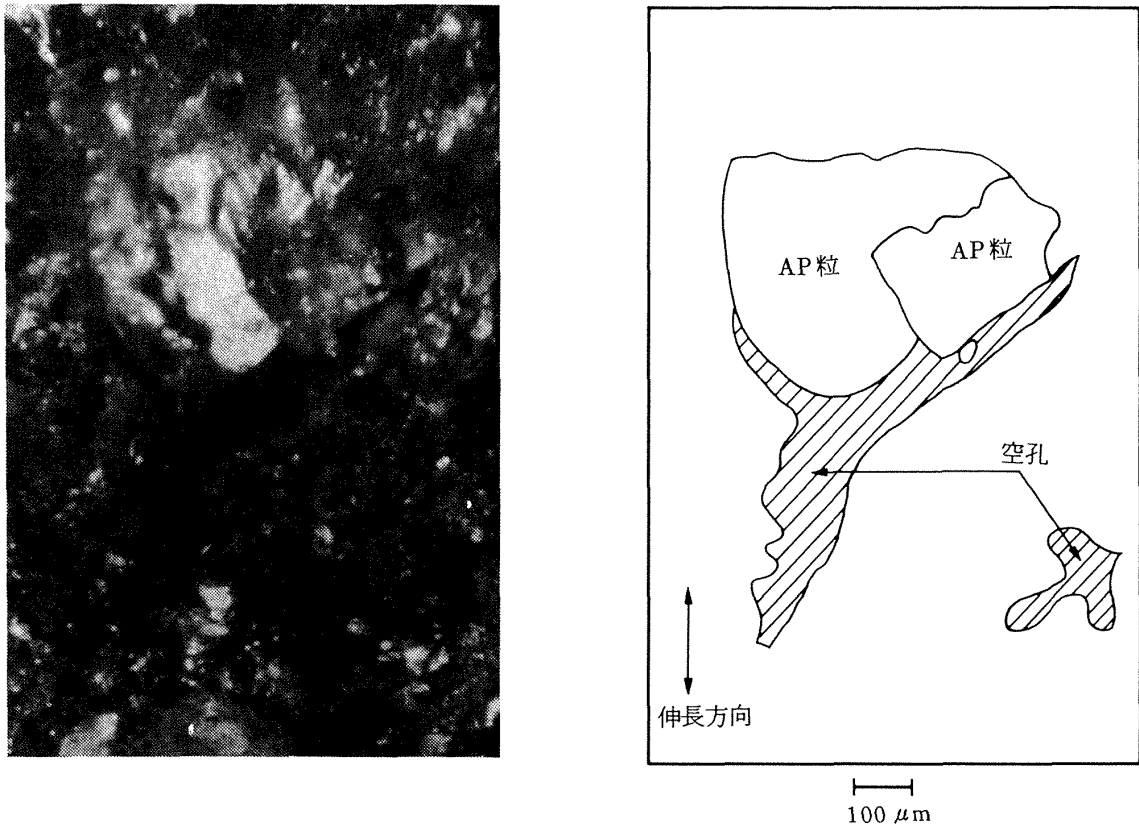
(b) 空孔の拡大図

図 12 複合固体推進薬の応力緩和試験における微細観測 (BP-17 推進薬, 温度 20°C, 歪 ≒ 40%(一定).)



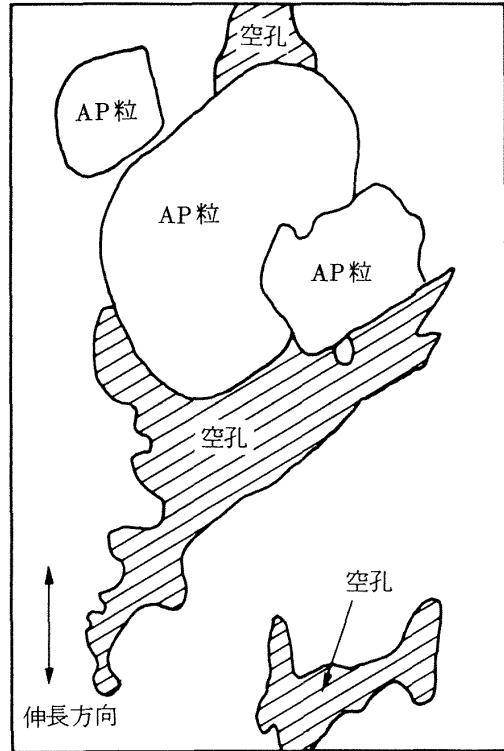
(c) 伸び切り状態の柱状粘結剤

図 12 (つづき)

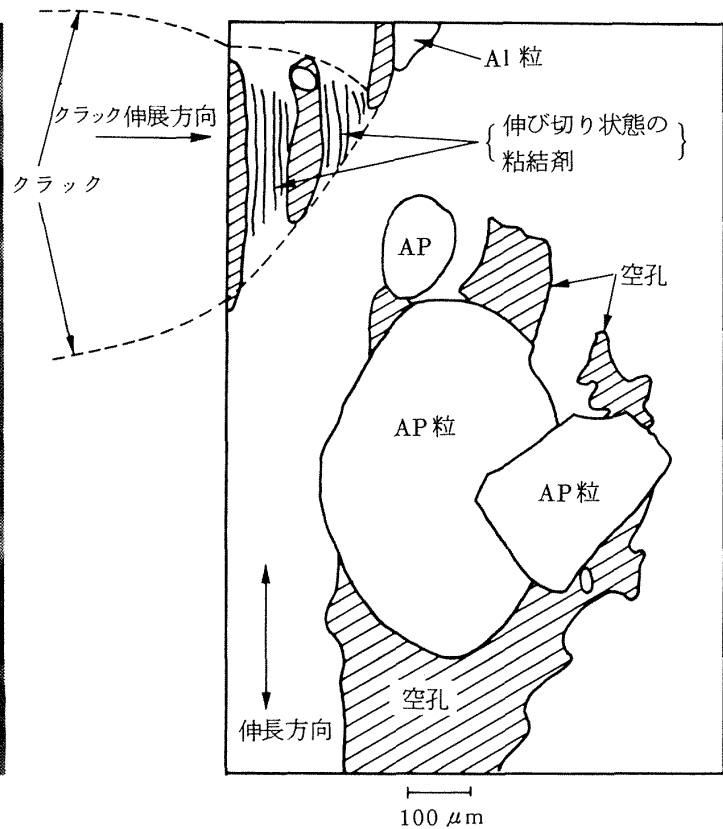


(1) AP粒周辺に空孔の発生 ($t \approx 20 \text{ sec}$)

図 13 複合固体推進薬の破壊過程の微細観測連続写真
 (BP-17 推進薬, 3/10 物懇型試験片, 温度 20°C, 引張速度 20 mm/min,
 歪速度 $\approx 1.0/\text{min}$)

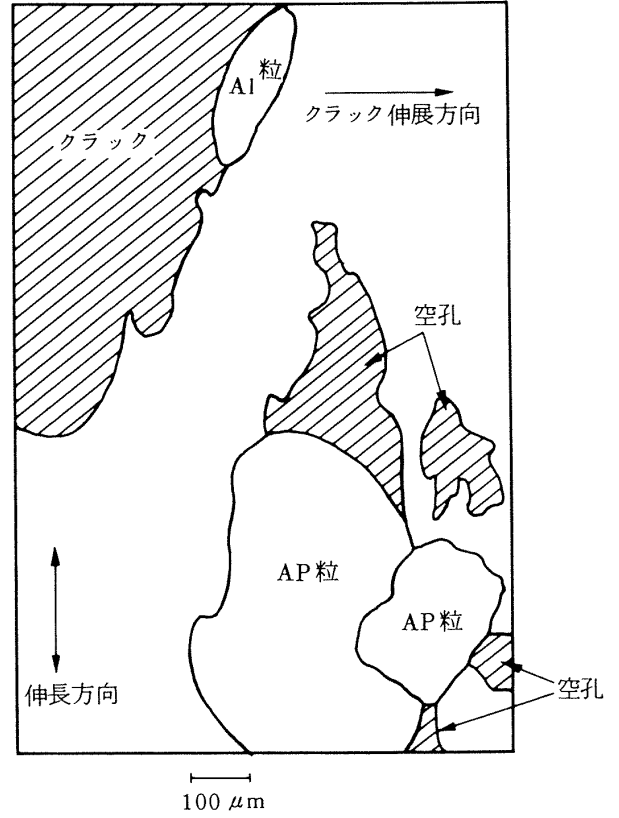
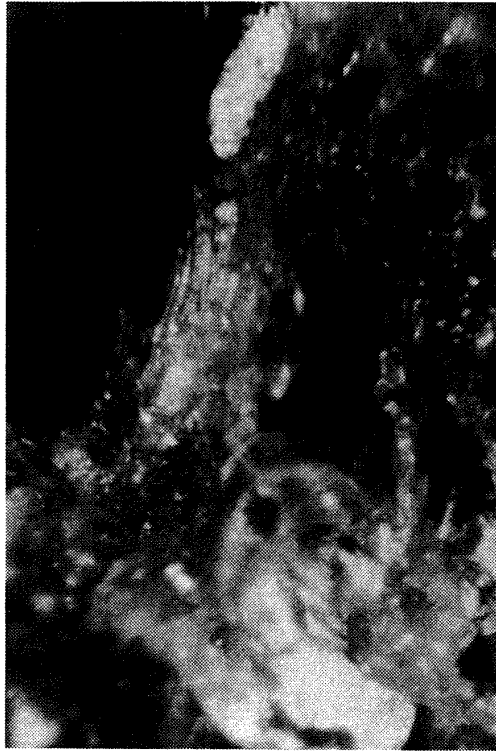


(2) AP 粒周辺の空孔の成長 ($t \approx 30 \text{ sec}$)

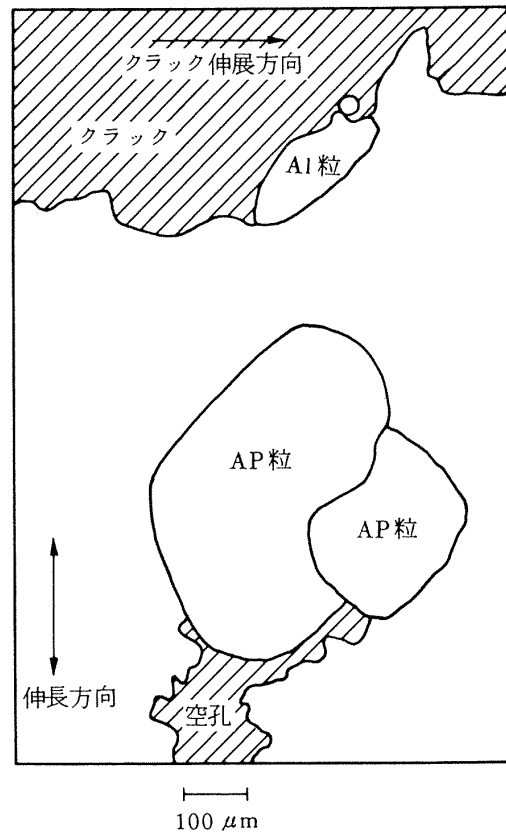


(3) クラック先端の接近 ($t \approx 40 \text{ sec}$)

図 13 (つづき(1))



(4) クラックの通過時 ($t \approx 45$ sec)



(5) クラック通過後の歪緩和 ($t \approx 50$ sec)

図 13 (つづき(2))

4. 結 論

複合固体推進薬の破壊過程を広範囲の温度環境下で光学顕微鏡観測するための装置を試作し、観測試験を行なったところ、次のような結論が得られた。

- (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) 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、モーター・ドライブ撮影、ムービー撮影等が望ましい。
- (3) 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がかなり不足する。場合によっては、光学顕微鏡以外の焦点深度のより深い観測系、例えば電子顕微鏡等の適用が期待される。

参 考 文 献

- 1) J. E. Bitzgerald, W. L. Hufferd; Handbook for the Engineering Structural Analysis of Solid Propellants, CPIA Publication 214, UTEC CE 71-089 (May 1971).
- 2) J. H. Wiegand; Recent Advances on Mechanical Properties Evaluation of Solid Propellants, ARS Journal, April 1962, pp. 521 ~ 527.
- 3) K. W. Bills, Jr., J. H. Wiegand; Relation of Mechanical Properties to Solid Rocket Motor Failure, AIAA Journal, Vol. 1, No. 9, September 1963, pp. 2116 ~ 2123.
- 4) 河田幸三, 井田峯人, 本堂明; 推進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, 1969年10月, pp. 521~532.
- 5) T. Godai, M. Shimizu; Pressure Exponent of Controllable Solid Rocket Propellants, AIAA Paper 72-1135, AIAA/SE 8th Joint Propulsion Specialist Conference, New Orleans (1972).
- 6) J. Okada; A Specimen Freezer for Use in Microscopy, Proc. 2nd International Cryogenic Engineering Conference, Brighton, United Kingdom, 7-10 May 1968, pp. 310 ~ 312.
- 7) S. Endo and 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.

既 刊 資 料

TM-440	三次元レイノルズ数遷音速風洞の調査研究	1981年9月	高島 一明, 沢田 秀夫 青木 竹夫
TM-441	壁圧を利用した揚力干渉修正法の有効性についての実験的検討	1981年8月	沢田 秀夫, 藤田 敏美 中村 正剛, 小松 行夫
TM-442	偏心円孔を有する円板の遠心および熱応力(有限要素法による計算)	1981年8月	松末 勝利, 橋本 良作
TM-443	航空計器統合の効果に関する研究	1981年9月	田中 敬司, 川原 弘靖 中沢 一夫
TM-444	次期計算機システム用ジョブ制御マクロの設計	1981年9月	土屋 雅子, 末松 和代 畑山 茂樹
TM-445	金属水素化物による蓄放熱装置の予備的研究	1981年9月	遠藤 浩, 伊藤 忠 高橋 宏, 関根 英夫 若尾 慎二郎, 島田 絃 関根 三弘, 金沢 祥
* TM-446	ファンエンジン FJR710/20 の騒音測定試験(1)	1981年9月	渡辺 実, 武田 克己 鳥崎 忠雄
TM-447T	Review of Aeronautical Fatigue Investigation in Japan : 1979~1981	1981年10月	Tadao KAMIYAMA and Toshiyuki SHIMOKAWA
* TM-448	FJR710/600 エンジン用排煙低減型燃焼器ライナ (#605) の開発試験	1981年10月	田丸 卓, 石井 浅五郎 堀内 正司, 齊藤 隆 西尾 健二, 下平 一雄 黒沢 要治, 山田 秀志 小倉 五郎

註 *配布先限定

航空宇宙技術研究所資料449号

昭和56年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 三興印刷
東京都新宿区信濃町12 三河ビル
