

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-730

X線テレビジョン透視法による固体ロケット・
モータの内部観測

藤原 勉 ・ 伊藤 克 弥 ・ 種 村 利 春
清 水 盛 生 ・ 五 代 富 文

1982年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

X線テレビジョン透視法による固体ロケット・ モータの内部観測*

藤原 勉** 伊藤 克弥** 種村 利春**
清水 盛生** 五代 富文***

Application of X-Ray Television Image System to Observation in Solid Rocket Motor

by

Tsutomu FUJIWARA, Katsuya Ito, Toshiharu TANEMURA,
Morio SHIMIZU, Tomifumi GODAI

The X-ray television image system is used to observe the solid propellant burning surface during rocket motor operation as well as to inspect defects in solid rocket motors in a real time manner. This system can test 200-mm-diameter dummy propellant rocket motors with under 2 per cent discriminative capacity.

Viewing of a 50-mm-diameter internal-burning rocket motor, propellant burning surface time transition and propellant burning process of the surroundings of artificial defects were satisfactorily observed.

The system was demonstrated to be effective for non-destructive testing and combustion research of solid rocket motors.

1. はじめに

固体ロケット・モータの燃焼特性を求めるために各種の試験装置が用いられているが、燃焼室内におけるプロペラント燃焼面の挙動を連続的に観測し、それにより燃焼特性を求めることは一般に極めて困難である。X線写真法は固体ロケット・モータの製造・保管時における非破壊検査に広く用いられており¹⁾、プロペラントとレストリクタの剝離等の検出に有効である。しかし、この場合のX線照射時間は1回につき数十秒ないし数分間を要し、静的挙動を調

べることはできてもプロペラント燃焼面の挙動を調べることは不可能である。また、従来の写真法はフィルムの設定、撮影、現像といった一連の作業に時間がかかり、試験結果の判定までに相当の時間を要し、また、経費・作業時間を考えると撮影枚数も制限せざるを得ない。

今回製作したX線テレビジョン透視装置は、(i)固体プロペラント内欠陥の有無、大きさ、プロペラントとレストリクタの剝離の検出などの非破壊検査、(ii)燃焼室内におけるプロペラント燃焼面の時間変化や欠陥まわりでのプロペラント燃焼状況の観測等を目的としており、X線写真法では不可能なリアルタイム観測^{2),3)}ができる点に大きな特長がある。

固体ロケット・モータの燃焼特性は燃焼開始時期

* 昭和57年5月10日 受付

** 宇宙研究グループ

*** 元・航空宇宙技術研究所

と、プロペラントが全て消費された燃焼終了期に相当する初期値と終端値から平均的に求められることが多い。燃焼時間中に諸条件が一定不変であれば問題は少ないが、実際の固体ロケット・モータにおいては、着火と燃焼終了時の過渡現象による燃焼室圧力・時間曲線の変化、燃焼室内空洞の容積増大に伴うガス流速の減少、ガス流による燃焼速度の変化等によって、燃焼特性が変化することは十分におこりうる。固体ロケット・モータの燃焼と性能の研究上、このような制約は非常に好ましくなく、固体ロケット・モータの性能評価に支障を来すことになる。そこで燃焼特性の瞬時値を求めるために幾つかの手法が考えられ用いられているが、問題点が多くストランド試験以外には実用化されるに至っていない⁴⁾。本報告に示すX線テレビジョン透視装置は、固体ロケット・モータ内部がリアルタイムで観測可能なことから、固体プロペラントの燃焼の挙動を連続して求めることができ、その結果を用いて燃焼特性の瞬時値を得ることが可能であると思われる。また、固体ロケット・モータに課せられた種々制約と燃焼特性の関係を求めるためにも適用可能であろう。尚、パルスX線間歇写真法⁴⁾は上記(ii)の目的のためには有効であるが、現象を連続して準リアルタイムに観測することは不可能である。

以下に固体ロケット・モータの非破壊検査と燃焼・性能の研究のためのX線テレビジョン透視装置と、本装置による直径80 mm ダミー固体ロケット・モータの人工欠陥(ドリル穴)検出、直径50 mm 固体ロケット・モータの燃焼の観測、および将来の応用について記す。

2. X線テレビジョン透視装置の概要および構成

この装置は、供試体を透過したX線をX線蛍光増倍管(Image Intensifier, 以下略してI.I.)で光学像に変え、これをTVカメラで撮影しモニターTVで観測するもので、供試体の内部を観測し同時にVTRに記録する装置である。従って、明るい映像をリアルタイムで観測できること、透視像を繰返し再生観測できることが大きな特長である。図1にこの装置の構成ブロック図を、図2に装置の制御部、記録観

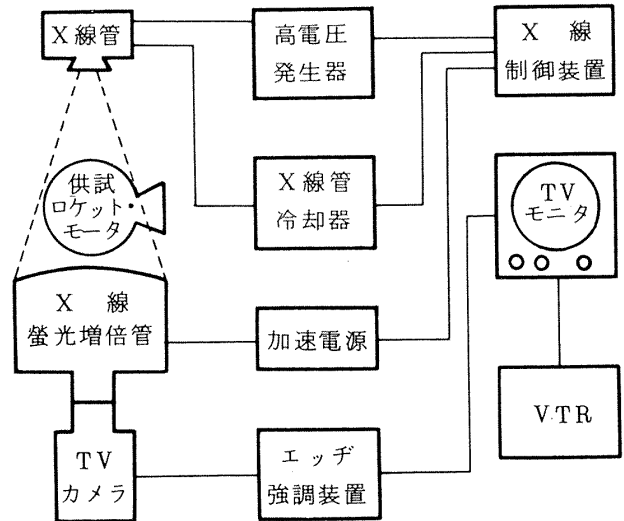


図1 X線テレビジョン透視装置構成図

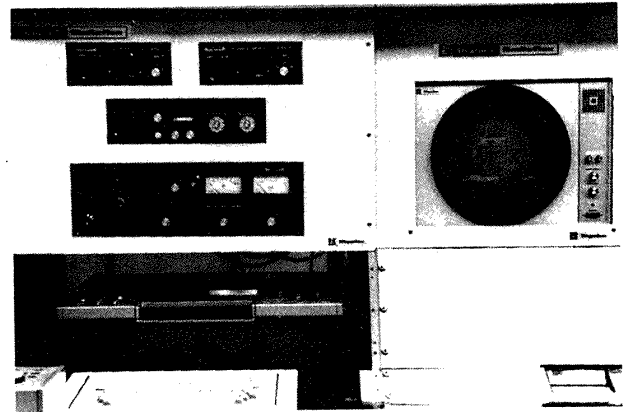


図2 制御部・記録観測部
(左上から6", 12" I.I. 制御部,
管電圧自動調整器, X線発生制御器,
UタイプVTR, 右側, X線モニターTV)

測部を示す。

2.1 X線発生装置

X線発生装置はX線管に印加される高電圧の整流方式の違いによって携帯式と据置式に大別され⁵⁾、今回設置した装置は据置式である。両者の性能比較等については3.2章で述べる。

X線発生装置はX線管、高電圧発生器、X線管冷却器、およびX線制御装置から構成されている。この装置は理学電機社製RF-160型であり、その主な仕様を表1に示し図3にX線管部を示す。X線管印加電圧は25 kVから160 kV連続可変であり、軟X線から硬X線までの範囲の線質を利用できる。X線管は二重焦点式で画像の鮮鋭度が必要な場合には小焦点を、透過力やコントラストが要求される場合に

表1 X線発生装置 (RF-160) の主な仕様

管電圧	25 ~ 160 KV		連続 可変	
管電流	大焦点	6 ~ 30 mA		
	小焦点	1 ~ 3 mA		
X線管	大焦点	3.0 × 3.0 mm	セラミック管	
	小焦点	0.5 × 0.5 mm	ベリリウム窓	
X線透視能力	高感度 フィルム	Fe	約 60 mm t	フィルム
		Al	約 250 mm t	フジ #40
	低感度 微粒子フィルム	Fe	約 30 mm t	Pb 0.03 増感紙 フジ #100
		Al	約 150 mm t	

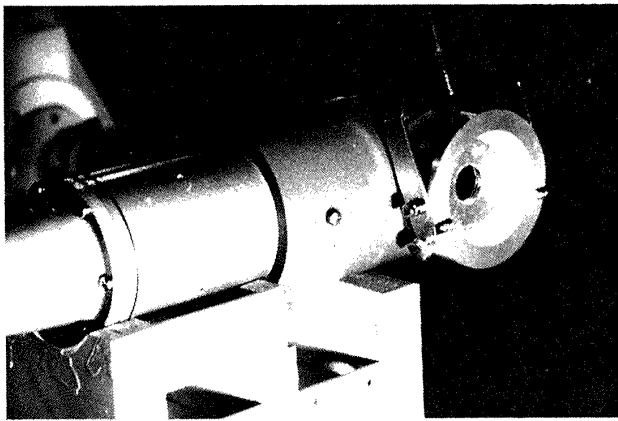


図3 X線管の外観

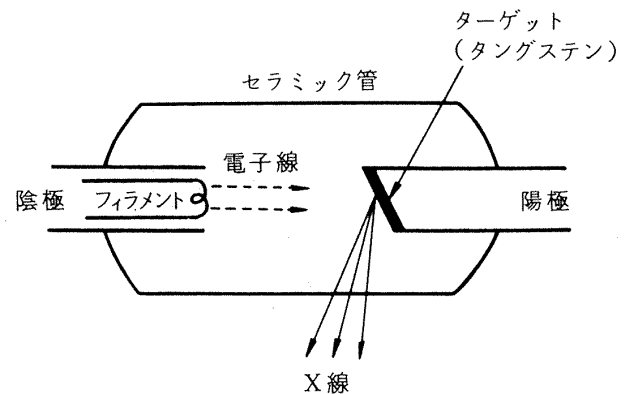


図4 X線管構造

は大電流を流せるよう大焦点を用いる。^{5),6)} また、X線管はセラミック製でX線放射窓はベリリウムであるため、従来型のガラス製X線管に比較して、

- (1) 長波長領域のX線量が多く、コントラストの良いX線画像が得られる。
- (2) 小型・軽量であり作業能率が良く、耐熱性、耐震性に優れている

等の優位点を持っている。図4にX線管の略図を示す。フィラメントから放出された電子が陽極の高電圧で加速されてターゲットに衝突し、X線が発生させる。X線の発生は、電子がターゲットに衝突した際に発生するエネルギーの1%程度に過ぎず残りの大部分は熱エネルギーに変わる。^{5),6)} このため、ターゲットの温度は極めて高温に達するので、陽極部の蒸発を防ぐために強制冷却が施されており長時間の使用が可能である。ターゲットは融点の高い材料が必要であり、しかもX線発生効率の点から原子番号

の大きい材料が要求される。ターゲット材料としては一般にタングステンが用いられる。^{5),6)} 尚、X線の放射角度は40度である。

2.2 X線蛍光増倍装置および撮影・記録装置等

X線蛍光増倍装置はX線像を数千倍の高輝度の光学像に変換する装置であり、⁷⁾ これは蛍光増倍管(I.I.)、加速電源、光学系レンズ、および制御器から構成されている。この装置は理学電機社製のRI-6D(6")およびRI-12T(12")であり、供試体の大きさによって使いわける。両装置共に電子ズーム機能を備えており透視像の必要な部分を高解像度で拡大して観測できる。その主な仕様を表2に示し図5にRI-12Tの外観を示す。

蛍光増倍管(Image Intensifier, I.I.)はX線テレビジョン透視装置の心臓部にあたり、画質はI.I.の性能に大きく左右される。I.I.の性能の代表値の一つに解像度(空間周波数)が挙げられ、両者共に

表 2 X線蛍光増倍管 (I.I.) の主な仕様

I.I. 機種	RI-6D	RI-12T
呼称	6"	12"
入力蛍光面径 (mm)	145	300
出力蛍光面径 (mm)	14.5	24.5
解像度 (Lp/cm)	42	36
変換係数 ($\frac{\text{Cd}/\text{m}^2}{\text{mR}/\text{sec}}$)	100	168
コントラスト	14 : 1	16 : 1
X線入射窓材	ガラス	メタル
蛍光体	CsI	CsI

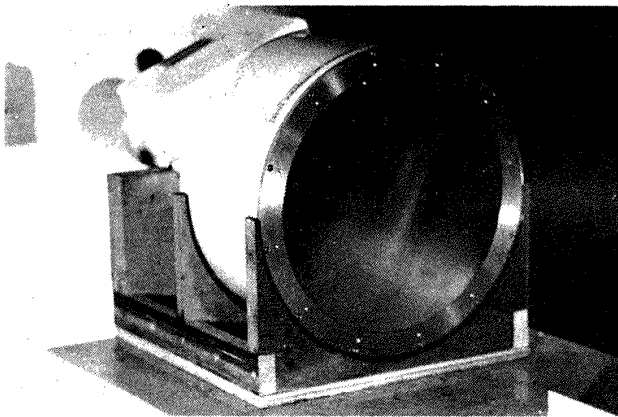


図 5 X線蛍光増倍管 (12") の外観

40 Lp/cm 前後と優れた値を示しており、特に RI-12T においては現在国内にある 12" クラスの I.I. の中では最高の性能を示している。解像度は識別できる最小限度の微細映像部の大きさを表わすもので、I.I. の入力面に解像度チャート (X線に対し不透明な鉛またはタングステン) を配置し、X線による出力像を観測したとき、見分け得る縞の数 (単位長に含まれる縞数) で表わしたものである。

I.I. の性能で重要なもう一つの特性である変換係数は I.I. の出力蛍光面輝度 (Cd/m^2) と入射面の位置で測定した X線線量率 (mR/sec) との比で表わしたもので、6", 12" I.I. 共に高い値を示している。入力蛍光面にはヨウ化セシウム (CsI) が用いられ、従来のものより輝度、解像度等が優れている。また、

RI-12T においては X線入射窓がメタル製でできており、従来のガラス製の入射窓に比して X線散乱の減少、コントラスト特性、解像度等が優れている⁸⁾。図 6 に X線蛍光増倍管の略図を示す。X線管から放射された X線は供試体を透過して、その透過度に応じた X線像を入力蛍光面上につくる。この X線像は蛍光面で光に変換される。蛍光面に接した光電面は蛍光面の発光によって光電子を放出させ、放出された光電子は集束電極と陽極の作用で集束加速されて出力蛍光面に到着し、X線像は可視像に変換される。出力蛍光面の輝度は像の縮小と陽極の加速作用によって数千倍に増幅される⁷⁾。

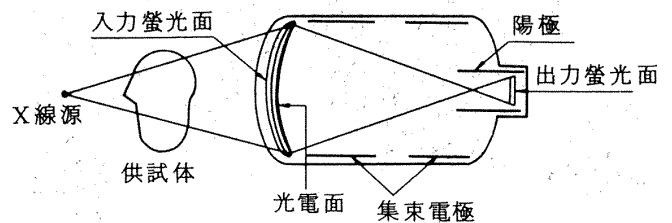


図 6 X線蛍光増倍管構造

I.I. 出力面に表われた透視像を忠実にモニタ TV に再現させ記録することにより、今迄困難であった固体ロケット・モータの連続的な非破壊検査や燃焼の観測が行なえるようになる。

TV カメラに用いられる代表的な撮像管は 5 種類あり、本装置には高感度、高コントラスト、焼付現象の極めて少ないニュービコン撮像管を用いた。また、VTR は工業用の U タイプを用いた。

モニタ TV 画面に映し出された X線透視像は、一般のテレビ映像に比較すると極めて不鮮明なものであり、モニタ TV 画像の目視観測による微細欠陥識別は極めて困難である。このため、不鮮明な画像を鮮明化することを目的として画像処理器を採用した。これは TV 信号をアナログ微分処理し、画像のエッジ部分を強調し微細な欠陥などを目視可能にする装置である。

3. X線テレビジョン透視装置 製作にあたっての予備実験

3.1 目的

X線テレビジョン透視法は量産品等の品質管理に

広く利用されているが、これが固体ロケット・モータの非破壊検査や燃焼挙動の観測に適用し得るかどうかを調べるために、まず、プロペラントの代りに不燃物のダミー・プロペラントを充填したダミー固体ロケット・モータを用いて透視実験を行なった。用いた供試ダミー固体ロケット・モータは、図7に示すように丸穴と4光芒付きのプロペラントグレインであり、それぞれのモータ燃焼室（鋼鉄製）の厚さは2mm、4mm、7mmの3段階に変えてある。また、ダミー・プロペラントには直径2mm、4mm、6mmのドリル穴がモータ軸と並行に設けてある。このダミー固体ロケット・モータの寸法は直径214mm×200mmであり、本装置を用いて実験を予定している直径190mm球型上段固体ロケット・モータの直径・プロペラント比重にほぼ等しいものである。予備実験に用いた装置の仕様を表3に、装置の構成を図8に示す。

X線発生装置は、本装置に用いてある据置式のRF-160と、性能比較に用いた携帯式のRF-200EG IIIである。X線透視像の観測に用いたTVカメラの撮像管とモニタTVは本装置に使用してあるものと同一タイプである。両X線発生装置のX線透過能力、モータ燃焼室厚さ2mm、4mmにおけるドリル穴の識別能力、モニタTVに映し出された透視像の画質などについて比較実験を行ない、本装置製作にあたって、直径190mm球型上段固体ロケット・モータへの適用可能性判定およびX線発生装置の機種選定の資料とした。

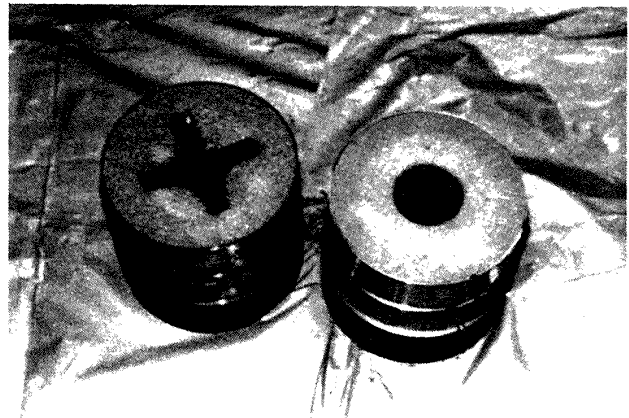


図7 X線発生装置の性能比較試験に用いた直径214mm×200mmダミー固体ロケット・モータ（燃焼室厚さは2mm、4mm、7mm 3段階）

表3 性能比較に用いた装置

X線発生装置	据置式 RF-160	表1 参照	
	携帯式 RF-200 EG III	管電圧	200KV max
		管電流	5mA max
		焦点	mm mm 2.1 × 2.1
	X線蛍光増倍管 RI-6D (6")	表2 参照	
TV装置関係	撮像管	ニュービコン	
	モニタTV	RX-2000N	
	走査線	625本	
	供試ダミー 固体ロケット・モータ	図7 参照	

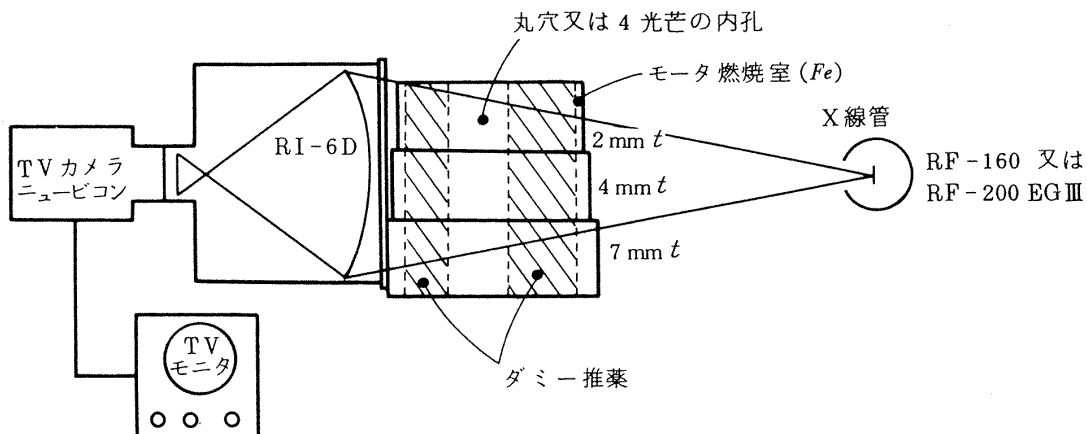


図8 ダミー固体ロケット・モータを用いたX線発生装置の性能比較試験

3.2 X線発生装置の性能比較

(1) 携帯式と据置式の比較

第2章において、X線管に印加される高電圧の整流方式の違いによって、X線発生装置を携帯式と据置式に大別した。本装置に用いてあるX線発生装置 RF-160 は据置式でX線管印加電圧が直流電圧であり、その電圧は最大 160 KV である。比較に用いた RF-200EG III は携帯式で印加電圧は交流電圧で最大 200 KV である。この印加電圧を発生させる高電圧発生器は据置式ではX線管と独立しており、一方、携帯式ではX線管と同一容器に収容されているので持ち運びには便利である。しかし、携帯式では高電圧発生器が比較的簡易にできているために、以下に示すような性能上の問題点が生じてくる。

X線管は基本的には二極真空管であるから、もともと整流作用があり携帯式では陽極に正の交流電圧が印加される交流の半周期だけ管電流が流れ、この間だけX線が放射される。陽極印加電圧は零からあるピークに達し再び零に戻り、次に負の半周期の間X線放射が停止する。このように印加電圧の大きな変動やX線放射の停止が繰り返される。その結果、携帯式ではX線強度や線量を最適値に設定する際、平均値としてしか設定できないことになり、またX線周波数とTV系の周波数との差異によるTV画面の明暗の変動等の問題が生ずる。一方、本装置に用いてある据置式の RF-160 は高電圧発生器が平滑直流式であるために、印加電圧の変動の無視できる連続した高電圧が陽極に印加される。このため、最適の一定X線強度・線量を設定できることになり、上記の問題は発生しない。

(2) X線透過能力の比較

両X線発生装置のX線透過能力を比較した場合、透過能力はX線波長に大きく依存し、その波長 λ は(目安として)

$$\lambda = \frac{12.395}{KV} \quad (\text{\AA}) \quad KV: \text{管電圧}$$

で表わされる⁵⁾。従って、管電圧の高い RF-200EG III がX線透過能力においては優れている。しかしながらダミー固体ロケット・モータを用いて両装置のX線透過能力比較を行なった結果、据置式の RF-160 のX線透過能力も供試ダミー固体ロケット・モ

ータに対して十分であることが明らかになった。なお、ロケット・モータ燃焼室の材質によっては RF-160 の装置ではX線透過能力が不足してくるが、その場合にはモータの燃焼室をX線吸収の少ない材料(例えばアルミニウムなど)で作る必要が生じよう。

(3) X線管焦点の大きさによる画質

X線透視像の画質を左右する要因にはX線管印加電圧の整流方式の他にX線管の焦点寸法も挙げられる。RF-160 には大・小2つの焦点が内蔵され、RF-200EG III は大焦点のみである。X線像は、レントゲン写真などで見られるように判読しにくい画像であるので、画像の鮮鋭度を必要とする場合にはできるだけ小焦点のものが半影効果を低減できるために有利である。

3.3 予備実験の結果

ダミー固体ロケット・モータを用いた両X線発生装置のX線透視実験による性能比較は、モニターTV画面の目視観察によって行なった。両装置のX線透過能力はダミー固体ロケット・モータの鋼鉄製燃焼室厚さ 4 mm に対しては十分その能力があり、直径 190 mm 球型上段固体ロケット・モータ(燃焼室:鋼鉄製、厚さ 3 mm)に適用できることが確認された。また、RF-160 は RF-200EG III に比べて下記の点で優れている。すなわち、

- (i) TV画面の明暗の変動が殆んどない
- (ii) 小焦点が利用できるので鮮鋭な画像が得られ、微細な欠陥等の観測に適している。

実際の試験において、ダミー固体ロケット・モータ(図7)に設けられたドリル穴の検出能力について両装置の性能を比較してみると、燃焼室厚さ 2 mm の位置においては両装置共に直径 2 mm のドリル穴が検出されたが、燃焼室厚さ 4 mm の位置では RF-200EG III では 2 mm のドリル穴の検出は困難であった。この原因は、X線強度・線量の変動が大きいことと焦点が大きいことに起因したものである。もし、テレビジョン法でなくて写真法であれば、撮影にある程度の露光時間が必要となり、画像の蓄積が行なわれるので量子雑音やX線強度・線量が平均化され、微細欠陥の検出も可能と思われる。

一方、RF-160 では、ダミー固体ロケット・モ

タに設けられた直径2 mmのドリル穴が4 mm厚の燃焼室を通して十分識別され、X線テレビジョン透視法における孔識別度限界(供試体の厚さに対して識別しうる孔の直径の比により表わす。X線テレビジョン法では1.5~2%)にはほぼ相当する検出能力があった。

以上の試験検討から、据置きX線発生装置RF-160が固体ロケット・モータの内部観測用X線テレビジョン透視装置のX線源に採用された。

4. X線テレビジョン透視装置を用いた固体ロケット・モータの非破壊検査および燃焼試験

本装置を用いて固体ロケット・モータの非破壊検査の予備試験と燃焼過程の観測試験を行なったのでそれぞれの試験方法と結果について記す。

4.1 X線テストチャートを用いた本装置の解像度試験

図9にテストチャートを示す(東ドイツEMIL FUNK, OPTIK FOTO社製, TYPE. NO. 38, Nr 36640, 空間周波数(Lp/cm): 0.6~5.0, サイズ: 50mm×50mm, 材質: Pb, 厚さ: 0.05mm)。このテストチャートを6"および12"のI.I.入力面に置き、X線を照射し、I.I.の出力面に表われたテストチャートのX線像をTVカメラで撮影しモニターTVで解像度を測定した。X線管焦点からI.I.入

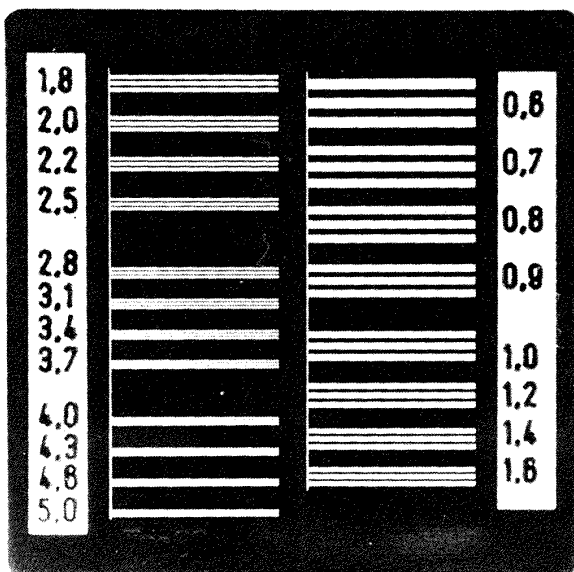


図9 解像度試験に用いたX線テストチャート

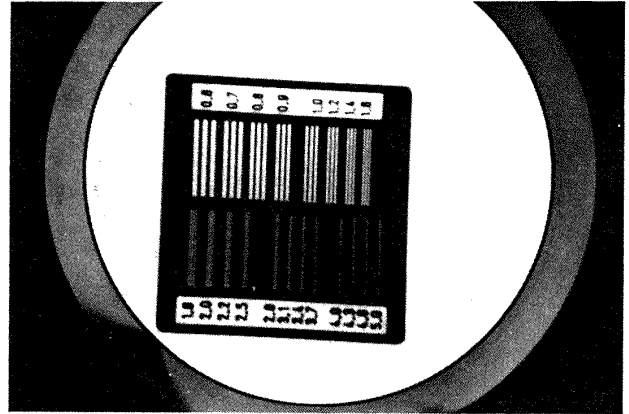


図10 解像度試験結果(6" I.I. 使用)

力面までの距離約900mm, X線管の電圧25KV, 管電流2mAである。

解像度試験結果の一例を図10に示す。これは6"径のI.I.を用いた解像度試験結果であり、モニター画面では28Lp/cm前後が識別された。また、12"径I.I.についてもほぼ同様の結果であった。表2に既に示したが6", 12"径I.I.共に解像度は40Lp/cm前後と既存のI.I.の中では優れた値を持っているが、この数値は出力螢光面に表われたテストチャートX線像を顕微鏡によって測定して得られたものである。一方、装置全体を通しての解像度は、先程述べたように28Lp/cmとI.I.自体の性能の約70%の値を示した。この性能の差異はTVカメラからモニターTVおよびVTRまでの配線が拾うノイズ信号、および散乱X線等の影響により生じたと思われる。

4.2 X線透視の準備

X線テレビジョン透視実験の略図を図11に示す。X線の放射角度は40度であるが、図11から分かるように透視に必要なX線の照射角度は、供試体の大きさと供試体中心からX線管焦点までの距離により決まり、I.I.入力面径もX線照射角度に応じた大きさに制限される。そして、供試体外に照射されるX線、すなわち図11の斜線で示した部分のX線は、X線TV透視を行なう場合きわめて有害である。斜線部のX線によって散乱X線が生じ、それがI.I.に入射し、結果として透視像がボケたり最悪の場合は像をまったく結ばなくなる。さらに鉛のマスクが無い場合には透視に不必要なX線が直接I.I.に入射してハレーションを起こす。従ってX線TV透視を行なう場合、より鮮明な透視画像を得るためには、図11に示した

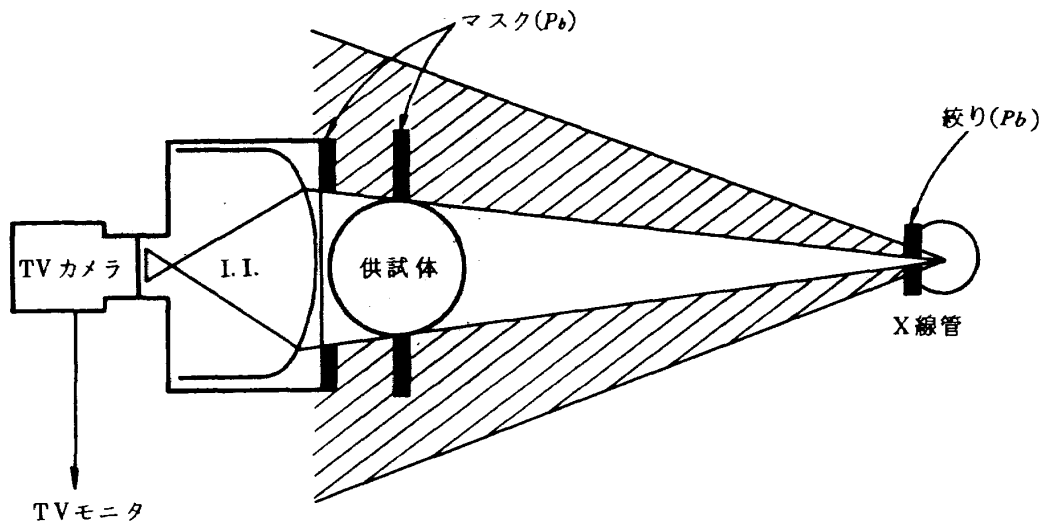


図11 X線透視における散乱X線の除去

ような鉛の絞りや鉛のマスクを設ける必要がある。

X線源と供試体間距離については、X線源からのX線線量は距離の2乗に反比例するので、X線源と供試体間距離をあまりに広くとるとX線線量の減弱が著しくなり、TV透視の場合は量子ノイズが増加して透視画像の観測が困難となる。逆にX線源と供試体間距離を狭くすると（X線はファンビーム状に放射されるため）半影効果が著しくなり、微細欠陥等の観測に支障を来す。但し、十分なX線透過能力（管電圧の高いX線源）を持ったX線源であれば、X線源・供試体間距離をできるだけ広く設けた方が半影効果低減に有利である。よって最良な透視画像を得るために上記の条件を考慮してX線・I.I.間距離を設定しなければならない。供試体とI.I.間距離については、散乱線の影響及び半影効果を低減するために供試体とI.I.を近接すべきであるが、I.I.入力面は熱や衝撃に弱いために燃焼実験の場合は、ロケット・モータからの熱伝達を防ぐ目的でI.I.入力面にはX線透視に支障を来さない範囲で断熱材（厚さ5mmのベークライト板）が取り付けられている。また、燃焼に伴う振動の伝達及び熱の伝達を防ぐためにI.I.入力面と供試体の間には隙間を設けている。

燃焼実験の場合、特に欠陥付ロケット・モータを燃焼する場合は爆発の危険性を伴うためX線管、I.I.を爆発から保護しなければならない。そのためには爆発に十分耐え得るケースで保護してやればよいが、X線管、I.I.を堅牢なケースに収納した場合は、ケ

ース壁透過時にX線線量の大幅な減弱が生じ、X線透視に大きな支障を来す。以上のことから爆発に対する対策は特に施されていないが、ロケット・モータの燃焼室が裂けて火炎が噴出した場合を考慮して、X線管をゴムシートで覆い、I.I.入力面にはベークライト板を取り付け、ゴム、ベークライトのアプリケーションを利用して火炎による焼損を防いでいる。

4.3 固体ロケット・モータの非破壊検査予備試験

本非破壊検査予備試験は、プロペラント内に存在する気泡の検出を行なうための予備試験として、ダミー・プロペラントに各種のドリル穴を設け、ドリル穴径を気泡の径に想定してX線テレビジョン透視を行ない、観測を行なったものである。

予備試験に用いた人工欠陥付直径80mmダミー固体ロケット・モータを図12に示す。直径40mmの内孔付グレインで、燃焼室は厚さ4mmのアルミニウム製である。ダミー・プロペラントに設けられた人工欠陥は、直径1mm、2mm、3mm、4mmのドリル穴であり、ロケット・モータ軸に対し垂直に設けられている。図13に直径80mmロケット・モータのX線テレビジョン透視の試験状況を示す。X線焦点から、I.I.入力面までの距離は550mm、X線管電圧55KV、X線管電流2.5mAでX線透視を行なった。モニターTVで観測した透視画像を図14に示す。帯状の明るい部分は直径40mmの内孔部であり、その上下の黒い部分がプロペラントである。内孔部が明るく見えるのは、そこが中空であるために、その上下の部

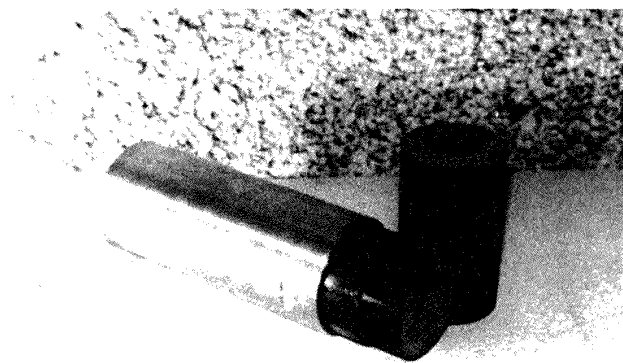


図12 非破壊検査予備試験に用いた人工欠陥付直径80mmダミープロペラントとアルミニウム製燃焼室

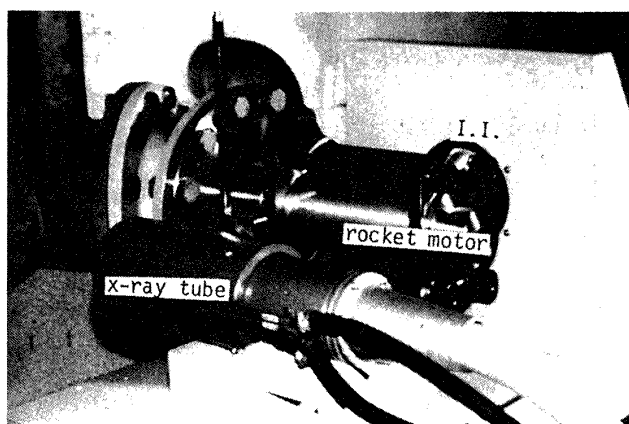


図13 X線透視中の直径80mmダミー固体ロケット・モータ

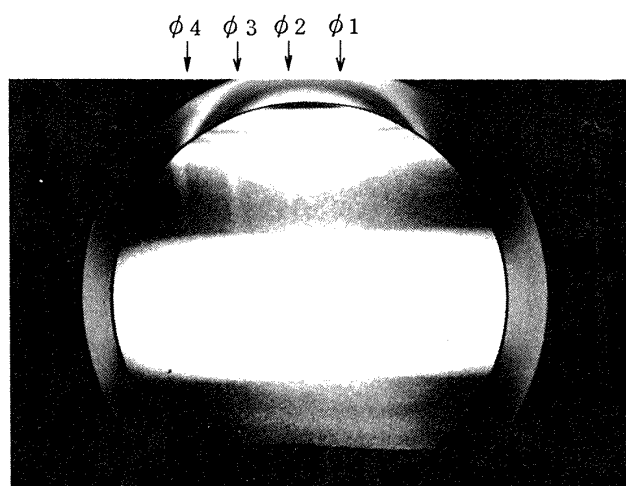


図14 X線TV透視による直径80mmダミー固体ロケット・モータの人工欠陥の観測

分よりプロペラントの厚さが薄くなっており、プロペラントの厚い部分を透過するX線に比して内孔部を透過するX線が強力になるからである。従って、供試体内部に欠陥が存在すれば、その部分が他の部分より明るく映し出されて検出される。設けたドリル穴の観測については、図14から分るように直径2mm以上のドリル穴は良好に観測できたが、直径1mmのドリル穴は不鮮明であった。この供試モータに対する孔識別度限界を求めてみると、固体ロケット・モータは一般に金属製燃焼室とプロペラント、レストリクタ等のゴム系の材料から成っており、両者のX線吸収係数（一般に比重の大きい物質ほどX線吸収係数が大きい）が異なっているので、単純に燃焼室の厚さにプロペラント等の厚さを加えて得られた値を供試体の厚さとして、孔識別度限界の算出に利用できないので、以下のような換算式を用いて供試モータの厚さ t の算出を試みた。

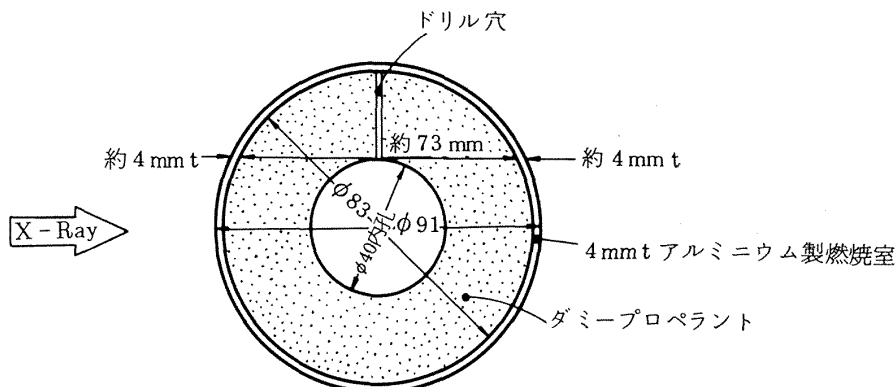
$$t = \frac{\text{燃焼室材料の比重}}{\text{プロペラントの比重}} \times \text{燃焼室材料の厚さ} + \text{プロペラントの厚さ}$$

上式は、X線吸収係数が物質の比重に比例して変化するものと仮定して、燃焼室厚さをプロペラント厚さに換算したものである。供試ロケット・モータはアルミニウムの比重2.7、プロペラントの比重1.7、燃焼室の厚さ約8mm、プロペラントの厚さ約73mm（レストリクタとプロペラントは共にゴム系であるためX線吸収係数は等しいものとみなし、プロペラント厚さはレストリクタの厚さを含んだ値）である。よって、上記仮定によるプロペラント厚さ換算値 t は、

$$t = \frac{2.7}{1.7} \times 8 + 73$$

$$\doteq 85.7 \text{ mm}$$

となり、約86mm厚さのプロペラントのX線透視を行なったことになる。プロペラント、燃焼室の厚さ測定箇所を図15に示す。この予備試験で直径1mmのドリル穴が検出できたので、換算値 t と直径1mmのドリル穴の比から本装置の孔識別度限界を求めてみると約1.2%となり、プロペラント中に気泡が存在した場合、プロペラント厚さ換算値の1.2%以上



(直径 80 mm ダミー固体ロケット・モータ断面図)

図 15 孔識別度限界を求めるにあたってのプロペラントと燃焼室の厚さ測定箇所

の気泡の検出は十分可能であると思われる。この数値は本装置の欠陥検出能力が優れていることを示すが、前述の仮定に基づいた試算値であり正確には各種材料、特に固体ロケット・モータに使用される各種燃焼室材料、プロペラント、およびレストリクタ等の X 線吸収係数を測定して算出してみなければならない。

次に示す図 16 は画像処理器によって図 14 に示した透視像を画像処理したもので、直径 1 mm のドリル穴が極めて良好に観測できている。このように、モニタ TV 画面に映し出された欠陥が不鮮明であっても、それが目視可能なものであれば、画像処理器を用いることによって鮮明化できるので欠陥検出が容易になる。欠点としては図 16 に見られるように、量子雑音までもエンハンスするために極めて荒い画像になってしまう。

プロペラント中の気泡形状の観測については、ロ

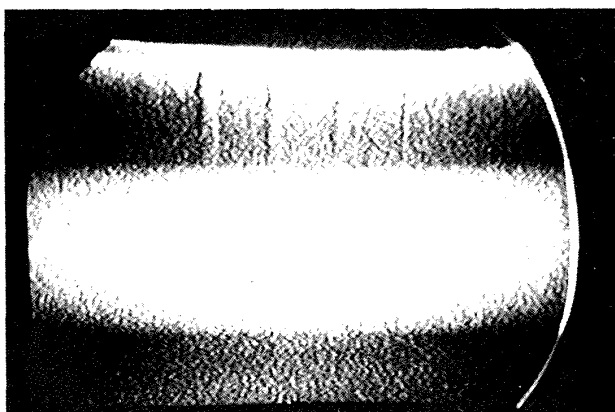


図 16 画像処理器による欠陥識別

ケット・モータを軸中心に回転させながらの観測結果と、ロケット・モータを固定して軸方向からの観測結果から気泡形状を知ることが可能と思われる。今後、各種気泡が注入された直径 190 mm 固体ロケット・モータ（燃焼室：3 mm 鋼鉄製、4 mm アルミニウム製）について観測を行なう予定である。

プロペラント内のクラックの検出に関しては、クラックを想定して、直径 190 mm 固体ロケット・モータ（燃焼室：4 mm アルミニウム製）のプロペラントに深さ 20 mm、幅 0.3 mm のノッチを設け、観測を行なった。クラックの検出には方向性があり、X 線束とクラック面が平行になった場合、クラックは最も明瞭に検出されるので、X 線束とクラック面の平行性を求めるためにロケット・モータを回転させながら X 線テレビジョン透視を行なった結果、プロペラントに設けたノッチが最も明瞭に観測できた位置を 0 度とすると、その±10 度の回転角度の範囲で観測された⁹⁾。この結果から、ノッチの検出に関しては上記寸法以上のものであれば検出は十分可能であるが、上記寸法以下になった場合や実際のクラックの様にクラック形状が複雑な場合の検出可能性については、この結果のみでは明らかでなく、各種ノッチ及びクラックを設けた固体ロケット・モータを製作し、実験しなければならない。また、直径 190 mm 固体ロケット・モータに設けられたノッチは直径 20 mm のストレートな内孔部のプロペラントに設けられており、内孔形状が単純なために検出は容易であるが、グレイン形状の複雑なプロペラントにノッチ

あるいはクラックが存在した場合は、グレイン形状の像とノッチ等の像が重なりあうために検出は困難であると思われるので、これについても実験が必要であろう。

4.4 人工欠陥付直径 50mm 固体ロケット・モータの燃焼状況の観測

本試験に用いた人工欠陥付直径50mm 固体ロケット・モータを図17に示す。プロペラント直径は、44 mmで中心に直径12 mmの内孔が設けてある。燃焼室はアルミニウム製で、厚さ2 mmである。人工欠陥として直径0.5 mm、1 mm、2 mmのドリル穴がロケット・モータ軸に対し垂直に設けてあり、各々のドリル穴は内孔面に達している。プロペラントのバインダは直径190 mm 球型上段固体ロケット・モータのものと同じHTPBで、酸化剤等の組成も同じである。図18に燃焼状況の観測結果の一部を示し、図18の説明を図19に示す。写真右側がノズル方向で、左方向にイグナイタがある。写真下部に見える数字のうち右側の4数字は燃焼時間を表わし、そのうちの右端2数字はテレビのフレーム番号(1フレーム: 1/30 sec)を表示している。この燃焼試験の場合、点火後17フレームのカウント数でプロペラント燃焼面の変化開始が観測できたので、約0.5秒の点火遅れが生じたものと思われる。人工欠陥部の燃焼に関しては、特に直径0.5 mmのドリル穴の燃焼に他の直径1 mm、2 mmのドリル穴には見られない現象が観測された。直径1 mm、2 mmのドリル穴の燃焼面は燃焼開始時から終了時までほぼ平行に広がるが、直径0.5 mmドリル穴の上端(燃焼室)側と下端(内

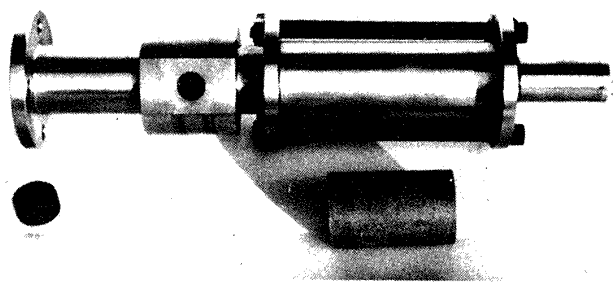


図17 燃焼実験に用いた直径50mm ロケット・モータ燃焼室と人工欠陥付プロペラント

孔)側とでは穴の径の広がり方に差異があり、上端側が狭く下端側が広がっていて、クサビ型を呈している。これが侵蝕燃焼の影響か、あるいは穴の径が小さいために火炎伝播の遅れによって生じたものかは、この試験のみでは明らかでない。寸法的に精度の高い測定が可能なパルスX線法等の写真法およびストランド試験による詳細観測が必要であろう。

5. 考 察

このX線テレビジョン透視法は多くの分野で応用されているが、固体ロケット・モータの燃焼の研究に用いた例は現在のところ報告されていない。

この装置の制約から直径190 mm以上の固体ロケット・モータへの適用には必ずしも適当ではないが、小型固体ロケットを用いて次のような研究に用途が考えられる⁴⁾

(1) プロペラントの侵蝕燃焼

プロペラント表面に沿ったガス流によって燃焼速度が変化する現象は侵蝕燃焼として知られているが、プロペラント燃焼面の後退速度と流路面積変化を求めて、プロペラント侵蝕燃焼係数と流速との関係を得ることができる。

(2) レストリクタ・ライナの耐熱性

固体ロケット・モータ燃焼中のライナ、レストリクタの減退、破損、変形の状況を観測できる。

(3) プロペラント着火時の燃焼面変化

プロペラント着火過渡期においてイグナイタ噴流によってプロペラント燃焼面の変化がおこるが、それを観測できる。

(4) 比推力の瞬時値

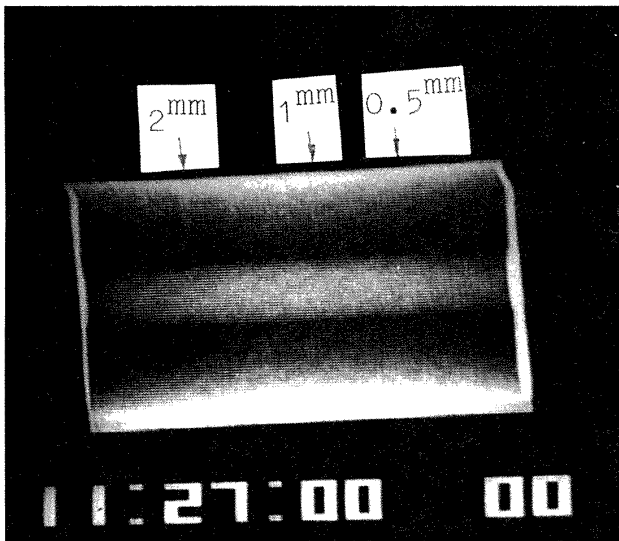
プロペラント燃焼面の連続した時間変化の観測により、プロペラント消費量を求めることができるので、X線テレビジョン透視と同時に推力測定を行えば比推力の瞬時値が得られる。

(5) イグナイタの挙動

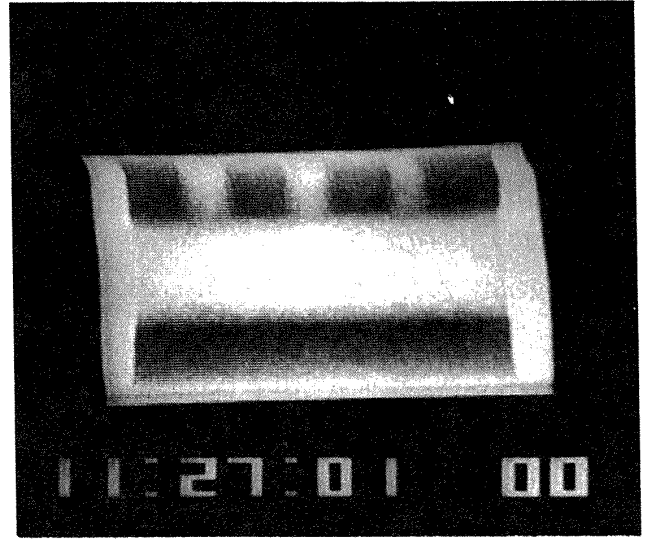
ペレット、装薬の消費のしかた、不具合等を観測できる。

(6) アブレーション・ノズル

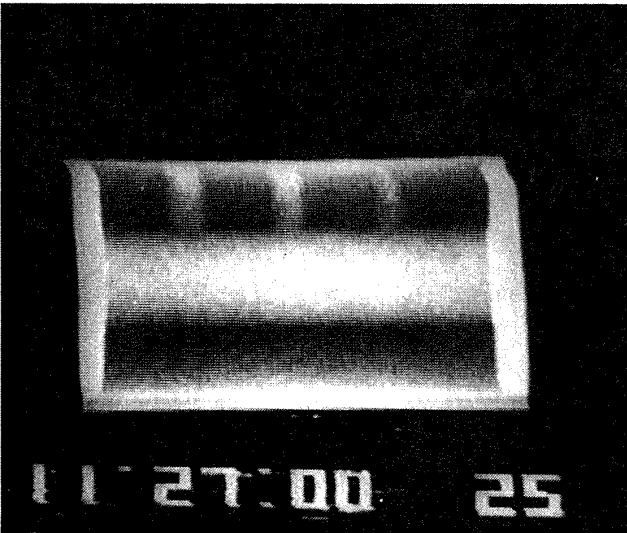
アブレーション率の測定、不均一なノズルの減り等の現象を観測できる。



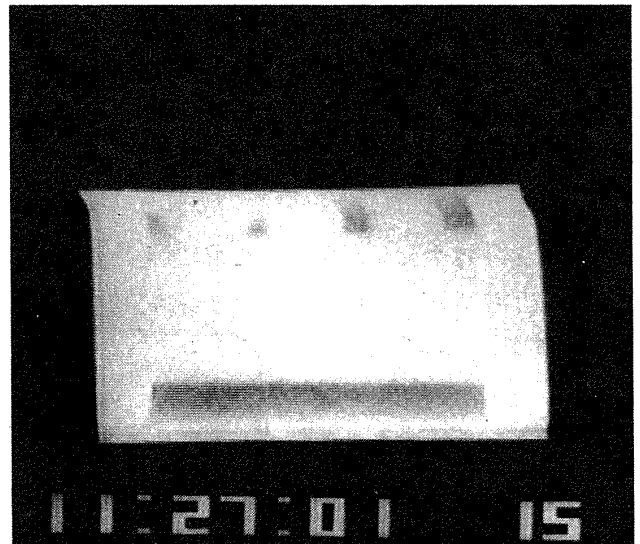
No.1 点火前



No.3 点火1秒後



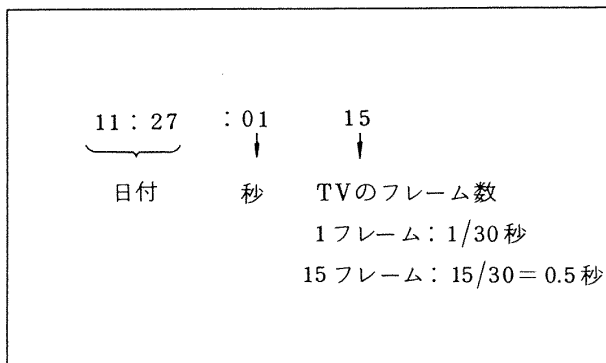
No.2 点火0.83秒後



No.4 点火1.5秒後

図18 X線TV透視による人工欠陥(ドリル穴)付直径50mm固体ロケット・モータの燃焼状況観測

(a) 数値の説明 (例: 写真No.4)



(b) クサビ型燃焼部分の図示

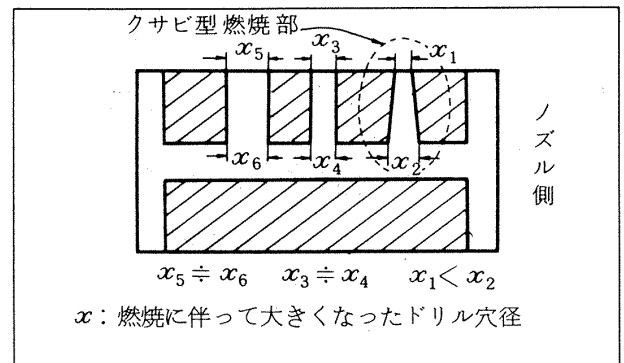


図19 写真説明

実機サイズの大型固体ロケット・モータのX線テレビジョン透視に関しては、高エネルギーX線発生装置の適用が考えられるが、現状のI.I.に対しては高エネルギーX線は透過力が大きいために殆んど通過してしまい、透視像の形成が困難となったり、量子雑音増加による欠陥識別度の低下などの問題が生じる。このような問題点について改良が施された、I.I.を用いた高エネルギーX線テレビジョン透視装置^{10),11),12)}が鋼板(板厚数十mm～数百mm)の非破壊検査用に試作されている。

現在、実機サイズ固体ロケット・モータの非破壊検査はX線源にベータロンやライナックを用いた写真法による内部検査が行なわれている。今回製作したX線テレビジョン透視装置を用いて得られた試験結果や、将来予定している各種試験から得られる結果が高エネルギーX線源と高エネルギー用I.I.を組合せた大型固体ロケット・モータ用のX線テレビジョン透視装置の製作に際し有益な資料となるであろう。

6. 結 論

X線テレビジョン透視法が固体ロケット・モータの燃焼研究や非破壊検査に有効であることを示した。

人工欠陥付直径50mm固体ロケットの燃焼の観測は、プロペラント燃焼面の時間変化、人工欠陥部分の燃焼状況が良好に観測された。

参 考 文 献

- 1) CECIL R. FRENCH; Radiographic Examination of Large Filament - Wound, Solid-Propellant Motor Cases, *Materials Evaluation*, August 1966, P. 412~416
- 2) ROBERT C. McMASTER, MERLE L. RHOTEN, and JAYP. MITCHELL; The X-Ray Vidicon Television Image System, *Materials Evaluation*, March 1976, P. 46~52
- 3) ERNEST ROBERTS, Jr.; REAL-TIME RADIOGRAPHIC INSPECTION FACILITY,

NASA TECHNICAL NOTE, NASA TN D-8529, August 1977

- 4) 五代富文, 種村利春, 藤原勉, 清水盛生, 伊藤克弥; パルスX線間歇写真法による固体プロペラントの燃焼に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-543, 1978年9月
- 5) 日本非破壊検査協会編; X線作業主任者用テキスト, 1975年
- 6) *Fundamentals of Radiography, Materials Evaluation*, March 1978, P. 24~32
- 7) 長谷川伸; X線蛍光増倍管の解像能力, 応用物理, 第35巻第2号, 1966年, p.103~109
- 8) 荒牧成光, 佐野哲, 杉山正弘, 石渡久男, 原尾紀男; 9/7インチメタルX線イメージインテンシファイア, 東芝レビュー, 35巻8号, 昭和55年, p. 707~712
- 9) 清水盛生, 藤原勉, 種村利春, 伊藤克弥, 五代富文他; Application of X-Ray Image System to Nondestructive Evaluation and Combustion Research of Solid Rocket Motor, The 13th International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, June 28 - July 2, 1982
- 10) K. NISHIBORI, S. MAKINO, K. HASHIMOTO and M. KOBAYASHI; Non-destructive Testing of Thick Steel Plate by Means of a Betatron, X-ray Image Intensifier and Television System, Proceedings of the Fourth International Conference on NON-DESTRUCTIVE TESTING, September 1963, P. 88~91
- 11) 鈴木敏允, 藤内武徳, 小田稔, 馬殿造路; リアルタイム高エネルギーX線検査システムの開発, 三菱電機技報, Vol.55, No.10, 1981, p. 51~54
- 12) 日本非破壊検査協会編; 非破壊検査便覧, 第4版, p. 262~263

既 刊 報 告

TR-720	チューンドドライジャイロの近似伝達関数の有用性について Study on Utility of an Approximated Transfer Function of Dynamically Tuned Dry Gyro	1982年7月	新宮博公・大月正男 早野友康
TR-721T	Time Response Approach to Numerical Computation of Asymptotic Series in Unsteady Aerodynamics for a Lifting Surface in Incompressible	August, 1982	Yoshikazu MIYAZAWA
TR-722	ニュートン流理論を用いた三次元物体の動安定微係数の計算 Calculation of Damping Derivatives for Arbitrary 3-Dimensional Bodies Using Newtonian Impact Theory	1982年8月	柳沢三憲・菊地一雄
TR-723	吸着層をもつ金属表面での稀ガスの散乱 Scattering Rare Gases from the Metallic Surfaces with Adsorbed Layers.	1982年8月	恩地 瑛・津田尚一
TR-724	有限要素法を用いた三次元物体の空気力学的係数の計算 Finite Element Calculations for Aerodynamic Coefficients of 3-Dimensional Body in Subsonic Flow Using Green's Function Method	1982年8月	柳沢三憲・菊地一雄
TR-725	ロケット用液酸ポンプの動特性の研究(その1)	1982年8月	志村 隆・上條謙二郎
TR-726T	Numerical Simulation of Transonic Flutter of a Supercritical Wing	August, 1982	Koji ISOGAI and Kohei SUETSUGU
TR-727	熱線を用いた近速用直示式風速計の試作 Anemometer with Direct Velocity Indication Used Three Thin Wires for Low Wind Velocity	1982年8月	高木正平
TR-728	空気吸込式ロケットの研究(II) - ロケットノズル数の影響 A Study of Air Breathing Rockets (II) - Effects of Number of Rocket Nozzles	1982年8月	鎮西信夫・升谷五郎 小室智幸・工藤賢司 村上淳郎・石井進一
TR-729	翼胴結合体の空気力学的特性に関する研究 A Study of Aerodynamic Characteristics of Wing Body Combinations Part I, Case of a Mid-Wind Airplane	1982年8月	柳沢三憲・菊地一雄

航空宇宙技術研究所報告730号

昭和57年8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 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan