

UDC 621.386.1:  
621.454

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## TR-543

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

五代富文・種村利春・藤原 勉  
清水盛生・伊藤克彌

1978年9月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 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

五代富文\*\* 種村利春\*\* 藤原 勉\*\*  
清水盛生\*\* 伊藤克彌\*\*

## Studies of Solid Propellant Combustion with Pulsed Radiography

By Tomifumi GODAI, Toshiharu TANEMURA, Tsutomu FUJIWARA,  
Morio SHIMIZU and Katsuya ITOH

Pulsed radiography was applied to observe solid propellant surface regression during rocket motor operation. Using a 150-KV flash X-ray system manufactured by the Field Emission Corporation and two kinds of film suppliers, images of the propellant surface of a 5-cm-diameter end-burning rocket motor were recorded on film.

The repetition frame rate of 8 pulses per second and the pulse train length of 10 pulses are limited by the capability of the power supply and the heat build-up within the X-ray tube, respectively.

The experiment demonstrated the effectiveness of pulsed radiography for observing solid propellant surface regression. Measuring the positions of burning surface images on film with a microdensitometer, quasi-instantaneous burning rate as a function of pressure and the variation of characteristic velocity with pressure and gas stay time were obtained.

Other research items to which pulsed radiography can be applied are also suggested.

### 1 はじめに

固体ロケット・モータの燃焼特性は着火時、すなわち、燃焼開始時期と、充填されていたプロペラントが燃焼して全て消費された燃焼終了時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。燃焼特性の基本量の一つである燃焼速度についていえば、製造時あるいは燃焼試験前に測定されたプロペラント・グレインのウェブ厚さを、燃焼試験によって明らかになった全燃焼時間あるいは有効燃焼時間で除すことにより求められており、その燃焼時間中の平均燃焼速度である。この間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、その燃焼時間中にプロペラント・グレイン形状によっては燃焼室圧力・時間曲線も漸増、中立、あるいは、漸減型と異なり、また、着火と燃焼終了時の過渡現象もその中に含まれる。燃焼室圧力の燃焼時間中における値をほぼ一定に抑えることは可能であるが、燃焼室内のプロペラントの消費につれて燃焼室内空洞の容積が増加することは避けられず、それに伴って内部のガス流速は減少し、燃焼ガスの燃焼室内滞留時間は増大し、その結果、燃焼特性が変化することは十分におこりうる。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おり、また、燃焼ガスの滞留時間が短くなると燃焼が燃焼室内で完全に行なわれず、未燃または反応不完全

\* 昭和43年8月8日受付

\*\* 宇宙研究グループ

なままで燃焼生成物がノズルから排出されるため比推力が低下することが予想される。

プロペラント燃焼特性に関する基本量の一つであるこの比推力についても、燃焼速度の場合と同じように、固体ロケットにおいては平均的な値として求められている。液体ロケット・エンジンであれば、プロペラントの流量は流量計により常時測定が可能であるから、推力の値をプロペラント質量で除して比推力の瞬時値が求められる。これに反して固体ロケットにおいては、比推力は推力の燃焼時間中における積分値である全力積を消費した全プロペラント質量で除して求められており、燃焼時間中における平均値としての意味しかない。

固体ロケットの燃焼と性能の研究上、このような固体ロケットに課せられている制約は非常に好ましくなく、燃焼中における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。

プロペラント内に低温で溶融する細いヒューズ線を複数本埋込んで、燃焼面の通過によって弱電流を流しているヒューズ線が切断した時に信号が得られることを利用して、既知の間隔をもつ2本のヒューズ線間の平均燃焼速度を求める方法は広く用いられている。特に、棒状プロペラントに適用して、定圧容器内で燃焼させるストランド試験は一般的手法である。この手法を固体ロケット・モータに応用した例もあるが非常に複雑であり、多数のヒューズ線をプロペラントに欠陥を生じさせることなく正確に埋めこみ、リード線を高温高压容器である燃焼室の外へ取り出すこと等問題点が多い。燃焼室圧力を急激に低下させることにより、または、それと同時に水を燃焼面へ散布することにより、固体プロペラントの燃焼を中断させることができる<sup>(1)</sup>。この特性を利用して燃焼中の固体ロケット・モータのノズル部を急速開放し、燃焼中断を行なわせてプロペラントを回収することにより、燃焼中の任意の時間一点におけるプロペラント燃焼面の状況が調べられる。多数のモータを時刻をずらしてこの方法で燃焼中断させることにより、全燃焼時間にわたってのプロペラントの燃焼面の変化を知り、これより燃焼特性の準瞬時値を求めることができる。しかしながら、この手間のかかる手法においては、別個の供試体の一連の燃焼中断から燃焼特性の瞬時値を求めることはデータのつながり上問題があり、また、一見燃焼中断したモータを再度着火させて次回の燃焼を行なわせても、着火過度現象等が含まれるため、統一的な特性値を期待することは困難である。小さなプロペラント試験片にマイクロ波をあてて燃焼面の後退速度、すなわち、燃焼速度を求める手法は小さい試験片に適用されており、ミリ秒のオーダーにおける燃焼速度変化が得られているが<sup>(2)</sup>、固体ロケット・

モータへこれを適用することは困難である。液体ロケットの燃焼研究に用いられる方法の一つに透明窓をもつ二次元燃焼室がある。同じ概念の固体ロケットへの応用も試みられたが、プロペラント側面に付けられている難燃性のレストリクタの存在、燃焼ガスによる窓の曇り、汚れ等によりロケット・モータ内部の正確な観察は困難であり、限られたプロペラント・グレインへの適用が時に行なわれている<sup>(3)(4)</sup>。

以上に述べた如く、従来試みられた各種の方法は燃焼室内における固体プロペラントの燃焼を観測し、それより燃焼特性を求めるためには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。本報告に示すパルスX線間歇写真法は燃焼室外側から非接触方式で内部に充填されているプロペラントの燃焼面の時間変化を求めるものであり、第5章に実験例を示すように固体ロケットの燃焼・性能に関する研究に広範囲にわたって応用できる可能性がある。

通常X線は固体ロケット・モータの非破壊検査に広く用いられており製造・保管時における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との剥れ等の検出に有効である。しかし、この場合のX線照射は数分間を要し、静的挙動を調べることはできても、燃焼中のプロペラントの瞬時像を得ることはできない。次章に記すパルスX線装置は70nsと極めて短時間の照射時間を持ち超高速現象をとらえることを目的として開発されたシステムであり、超高速粒子の表面への衝突、爆轟波等の現象の可視化に利用されている。このX線パルスを複数回、短時間の内に固体ロケット・モータに対して照射すれば、燃焼室内で燃焼しているプロペラントの挙動を求めることができ、その結果を用いて燃焼・性能の瞬時値を得ることができよう。以下に、固体ロケットの燃焼研究のためのパルスX線間歇写真装置と、それを用いて行なった実験、および将来の応用について記す。

## 2 パルスX線間歇写真装置

固体ロケット・モータ内部のプロペラント燃焼面変化を測定するためのパルスX線間歇写真装置は、パルスX線発生装置、フィルム供給装置、供試ロケット・モータ、フィルム濃度測定器からなる、パルスX線発生装置は図1に示すように、DC電源、パルサ、X線管、およびパルサを作動させるためのトリガ発生器から構成されている。その主な仕様は表1に示されている。この装置は米国フィールド・エミッション社製750-235型であり、高電圧をX線管へ供給する2350型パルサの出力は100~150KV連続可変で、コンデンサに蓄えられたエネルギーをX線管を通して急速に

放電させる。放電後直ちに充電するがその所要時間のためにパルスの最大繰返し速度は抑えられており、このシステムでは毎秒8パルスが最も速いレートである。X線管は図2に概略を示すが、針型の多数の陰極からの電子が真空中を加速されて中央の円錐型のタングステン製陽極を叩き、極めて短時間強いX線が発生させる。1回の実験におけるパルス数の合計は、このシステムでは10パルスに制限されているが、これは陽極が加熱されすぎてタングステンが蒸発することを防ぐためである。なお、陽極の熱容量が小さく抑えられているのは、X線源の寸法を小さくするためである。5290型X線管の特性は文献(5)によれば以下に示す通りである。

5290型X線管により発生したX線がアルミニウム板を透過する能力を図3に示している。目安としてX線管からフィルムまでの距離が1mの場合、概略厚さ30μmのアルミニウムが透過できる。図4はX線照射の時間特性であり、立上り50%から降下50%までの時間は約70nsであり、このため超高速写真撮影が可能となっている。プロペラントの燃焼速度は最大数cm/s、フィルムの送り速度は最大5m/s程度であるから、動きによるフィルム像の流れ(ぼけ)は無く完全な静止画像が得られる。図5はX線管から

前方へ照射されたX線の空間分布を示す。このように管軸より周辺へ遠ざかるにつれてX線強度が減少するため、ある距離に管軸と垂直に置かれたフィルム面上の濃度に変化があるが、この試験結果は第3章に記されている。この濃度変化を出来る限り少なくするためには平行に近いX線の照射が望ましいが、本装置の能力上、X線管からフィルムまでの距離はたかだが1m程度しかとることができなかった。

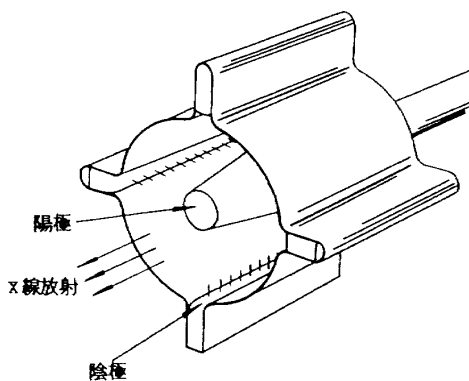
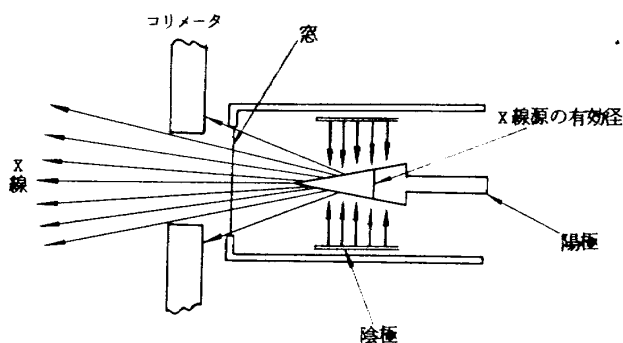


図2 フラッシュX線管

表1 パルスX線間歇写真装置の主な仕様

出力電圧	150KV max
パルサ電流	2000A max
パルス巾	70ns (50%値から50%値)
焦点大きさ	2.5mm
最大パルス速度	8パルス/秒
連続最大パルス数	10パルス/回

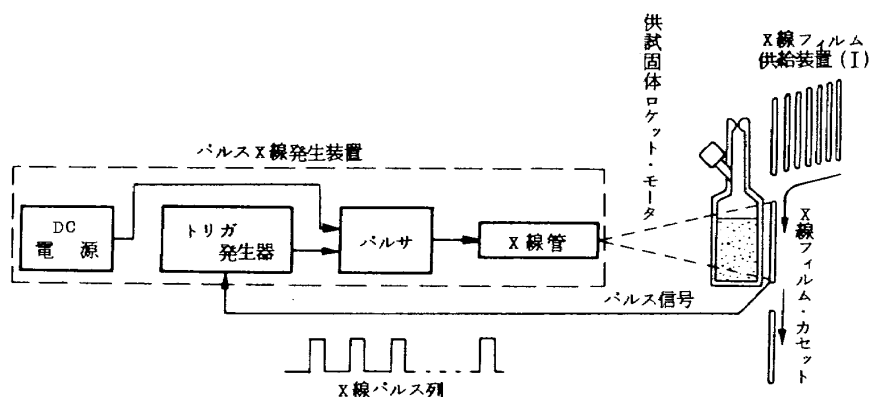


図1 パルスX線間歇写真装置(I)

フィルム供給装置は燃焼中の固体ロケット・モータにパルスX線が複数回照射されている際に、その内部のプロペラントの燃焼面の移動・変形をフィルム上に記録するためにフィルムを供給する装置である。1枚のフィルムに多重露出してフィルム上に複数個の像を表わす方式は、各像間で濃度差をもつ必要があり、プロペラント燃焼面のような不鮮明な像の場合には数個の多重露出像が限界であろう。しかもこの場合、像と背景との濃度差が小さいため、分解能の一層の低下がふりうるので望ましい方法ではない。従ってこの実験においては、1個の像は1枚のフィルムに記録することとし、供試体の後方にフィルムを連絡して供給するフィルム供給装置を製作した。X線の照射時間が短いためフィルムは撮影時に一々停止させる必要はなく、次々と供給されるフィルム（実際にはフィルムはカセットに1枚宛入れられている。）が被写体の後方を通過する瞬間にカセット自体でマイクロスイッチを働かせ、その信号をパルスX線発生装置のトリガ装置に送れば、X線がカセットの動きと同期して前方から照射され被写体の像がフィルムに撮影されることになる。フィルム・カセットを連続的に定位置へ供給する方式はいかなる手段でもよく、フィル

ム供給装置(I)では重力による自由落下方式、装置(II)では回転方式をそれぞれ用いた。

装置(I)ではレールに吊下っているカセット列をモータにつながっている糸で引張り、レールをはずれて次々とカセットが自由落下し被写体の後方を通過させる方式であり、カセット供給時間々隔、すなわち、露光間隔はモータ回転数で調節される。カセット枚数に特に制限がないことが特長であるが、自由落下のために露光間隔が短くとれず約0.5 secがその下限である。

装置(II)は直径約1.5 mの回転円板に10枚のカセットを固定しカセットが被写体後方を次々と通過するよう設定す

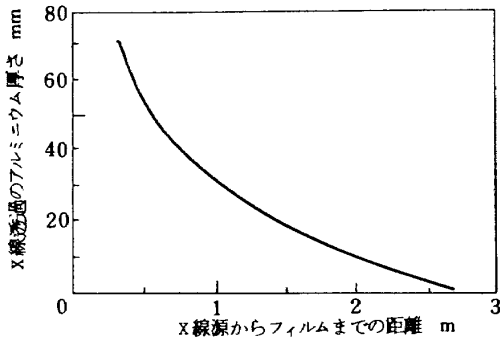


図 3 5290型フラッシュX線管のアルミニウム透過能力<sup>(5)</sup>

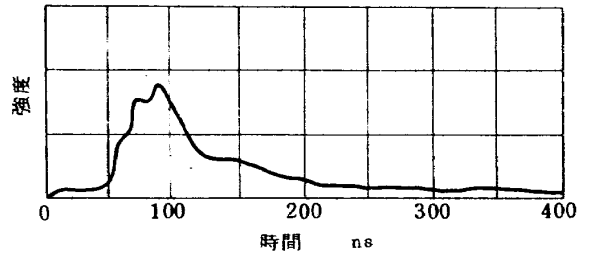


図 4 X線放射の時間特性<sup>(5)</sup>

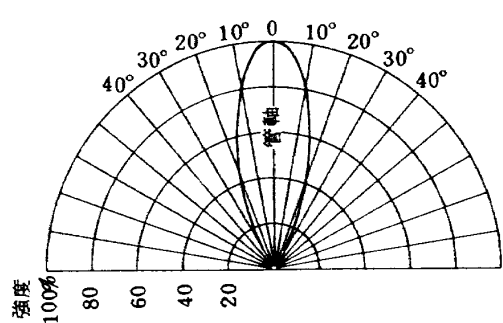


図 5 X線放射の空間分布<sup>(5)</sup>

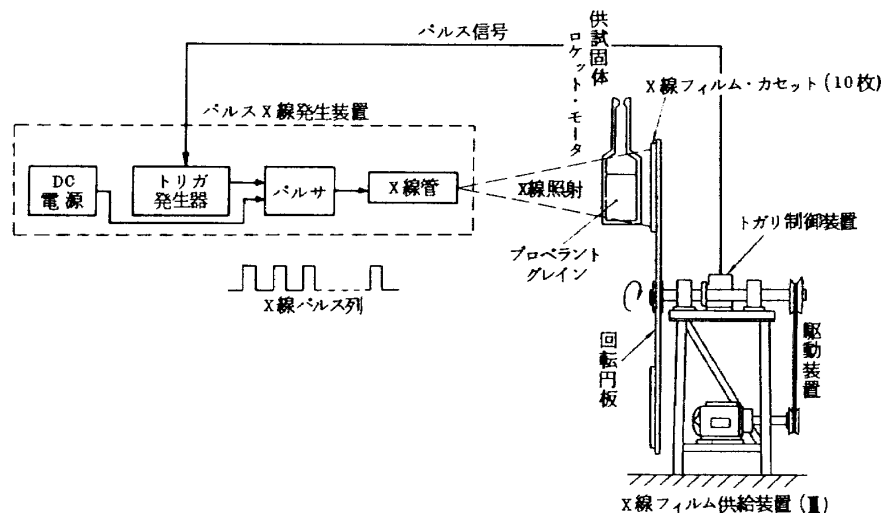


図 6 パルスX線間歇写真装置(II)

る。円板はモータによって駆動され1回の実験中その回転数は一定としている。円板回転数を変化させることにより露光間隔は0.1～1.5 secと変えられる。図6に全システムを、図7に装置(Ⅱ)の全景を、また、図8には第4章に記す実験のセットを示している。

使用したフィルムは、コダック・ブルーブランド医療用X線フィルムBB-54の六切サイズである。キッコーX線用増感紙HSによってフィルムを両面からはさむ形でカセットに充填している。現像条件はフィルム指定の方式により、タンクは垂直型を用いた。

現像されたフィルム上の像の位置変化を測定、自動記録するフィルム濃度測定器は、東京光電機製マイクロデンストメータ、ANA-R1400型である。図9にその構成を示

すように倒立顕微鏡に2次電子増倍管を取付け、試料送り装置でXあるいはY方向に送られる試料フィルムの微小面積の濃度を連続的に指示し、同時にペンレコーダに記録させる。使用する絞りによって異なるが0.5φのピンホールを用いると微小測定部の直径は5μmとなる。光電流を濃度に較正してあるため濃度は直接指示計にあらわれ、この指示計目盛を基準として記録紙上で濃度Dの較正を行なう。フィルムの送り速度は3mm/minであるが、これを100倍に高めて記録紙上では30cm/minで記録する。この装置によってフィルムの濃度分布を求めることができ、供試団体ロケット・モータ内プロペラント表面の位置決定が正確に行なえる。

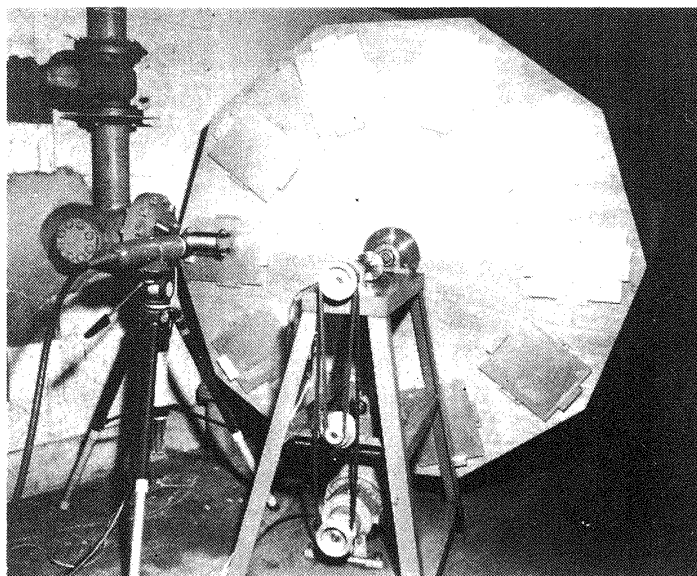


図7 パルスX線間歇写真装置(Ⅱ)の全景

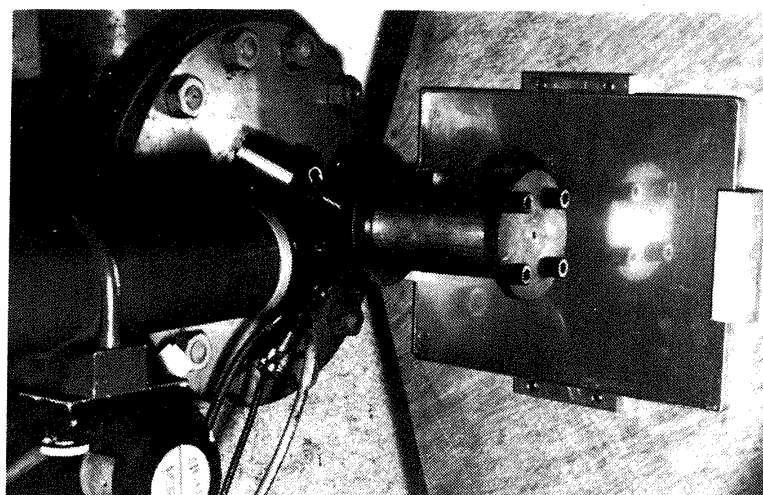


図8 装置(Ⅱ)の詳細

右：フィルム・カセット 中：供試ロケット・モータ 左：X線管

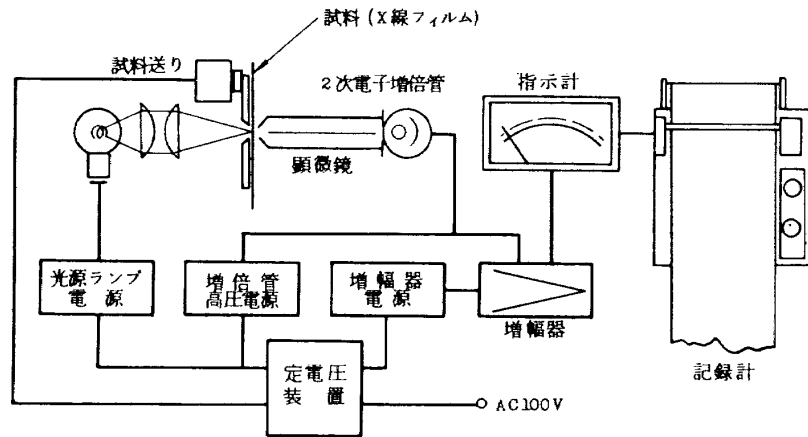


図 9 フィルム濃度測定用マイクロ・デンストメータ

### 3 予備実験

#### 3.1 目的

予備実験の目的は次の通りである。(1)パルスX線間歇写真装置が固体ロケット・モータの燃焼に関する研究に適用できるかその可能性を探る。(2)可能であるならば適用できる供試固体ロケット・モータとして好ましい大きさ、形状を知る。(3)総合的な解像力を知り、どの程度の精度までプロペラント燃焼面の位置決定が可能であるか、また精度改善の方策を探る。(4)固体ロケット・モータの燃焼室として望ましい材料を知る。(5)プロペラント・グレイン内に存在する欠陥をどの程度の大きさまで検出することが可能であるかを知る。

#### 3.2 方法

上記目的のために図10に示すような段階状プロペラント試験片を用意した。プロペラントの薬種は推力中断再着火可能な固体ロケット用に開発されたRS-1105と称する

コンポジット系プロペラント<sup>(1)</sup>である。酸化剤として、いずれも大きさが $10\mu m$ 程度の過塩素酸アンモニウム62.4%、過塩素酸カリウム15.6%を含み、燃料はポリブタジエン、アルミニウムは直径が約 $20\mu m$ の球型で含有率は24%である。階段状の光楔プロペラント試験片は1階段が高さ3mm、奥行10mmであり、ステップは25段あるため厚さは3mmから75mmまで変化しており、これを2ブロックに分けて製作した。プロペラントの階段下には、0.4、0.8、1.5および3.0φのキリ孔をあけ欠陥検出能力の検査に用いた。試験片のセットの仕方は図10に示したように、フィルム上に巾15mmで各々厚さが2種類あるアルミニウムと鉄鋼板を並べ、その上に楔型プロペラントを置きX線をその全体に照射した。

固体ロケット・モータの燃焼室材料としては、一般の地上燃焼実験においては鉄鋼が使われているが、このパルスX線発生装置の能力の制限の内でプロペラント像を出来る限り明瞭にするためには、燃焼室を透過する際のX線吸収が小さいことが必要である。表2に各種元素のX線吸収の

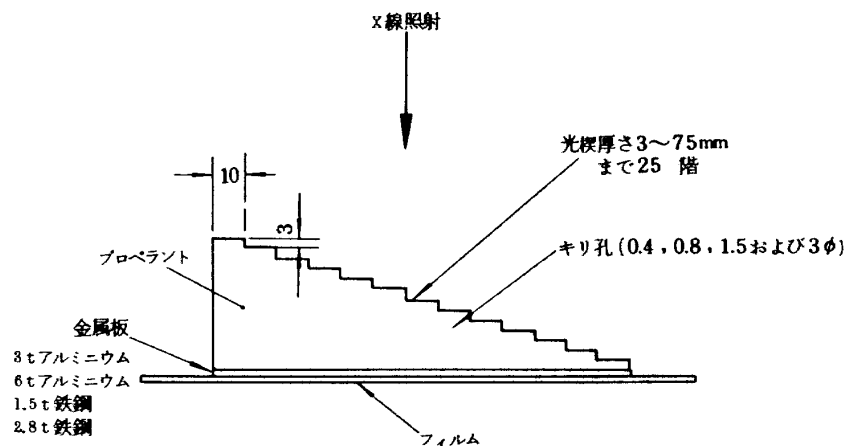


図 10 プロペラントのX線透過特性用階段状試験片

代表値(波長 1 Åにおける値)を示す。(6) X線の貫通しうる厚さは吸収係数  $\mu$  と密度  $\rho$  の積  $\mu\rho$  に反比例するが、アルミニウムが燃焼室材料として好ましく、鉄はこれと比べて桁違いに吸収が大きく実験上適当でないことが明らかである。

### 3.3. 結果

図 11 は被写体を何も置かずにフィルムにX線を照射した場合のフィルムの濃度分布を示す。図 5 に既に示した如く X線強度分布は X線管軸方向が最も強く、軸から離れるとその強度は低下する。フィルムは X線管軸の鉛直面に置

かれており X線源を中心とする球面上には位置していないために X線管からの距離も X線管軸からずれると遠くなる。この結果、X線管軸とフィルムの交点であるフィルム中心からのフィルム上の距離によってフィルム濃度は変化する。図 11 に示す例では中心部の濃度に対して 10% までの濃度変化が許されれば半頂角  $\theta$  は  $10^\circ$  まで許容でき、同じく 5% の濃度変化に対しては許容角は  $5^\circ$  である。例えば X線管からフィルムまでの距離が 38, 54 および 76 cm の場合、 $10^\circ$  の角度は、それぞれ、6.7, 9.5 および、13.4 cm に相当し六切サイズの X線フィルム(縦 20 cm, 横 25 cm)にはほぼ入る大きさである。この X線フィルム上の像を観測してプロペラント燃焼面がどこに位置しているかを決定するときには、濃度分布自体を求めることに意味がある訳ではなく、燃焼面の像、すなわち、プロペラントの存在している部分で無い部分の境界が求められればよい。研究の対象によってはこの濃度分布を求めることに意味のあることもあるが、第 4 章に記述する実験は前者のケース、すなわち、濃度の不連続線であるプロペラント面を求める例である。

図 12 は固体プロペラントとそのフィルム像を模型時に示したものである。X線管軸の延長上に対象としているプロペラント端面(I)がある場合はフィルム上の濃度変化はシャープであり像の位置決定には適しているが、プロペラントの燃焼が進みプロペラント端面が後退して X線管軸の延長上からずれてくると、プロペラント面(II)の像附近のフィ

表 2 X線の吸収  
(波長 1 Å)

$$\mu : 1/cm$$

$$\rho : g/cm^3$$

元 素	質量吸収係数 $\mu/\rho$	密 度 $\rho$	$\mu\rho$
Be	0.55	184	19
Mg	118	1.74	35.7
Al	14.1	2.70	103
Fe	100	7.87	6,190
Ni	121	8.7	9,200
Cu	130	8.89	10,300
Zn	145	7.19	7,500

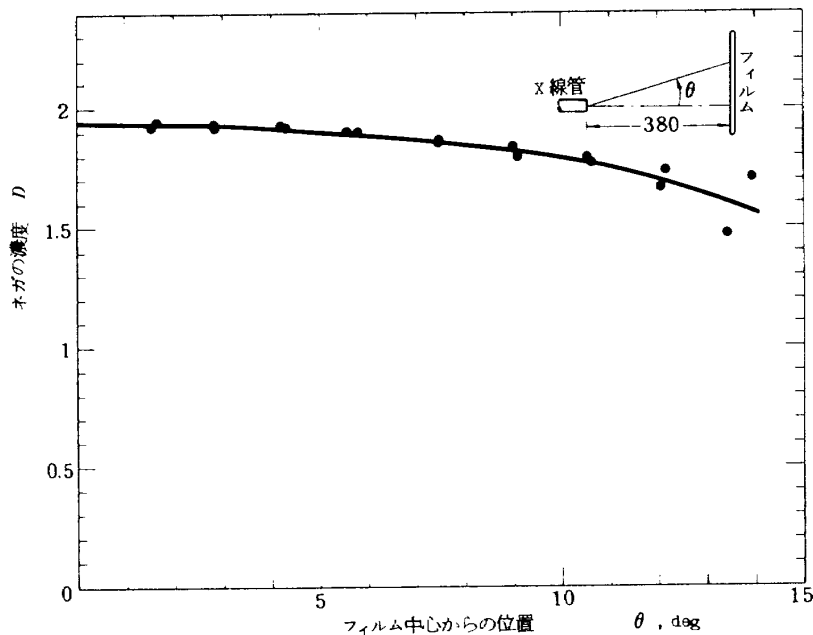


図 11 フィルム濃度分布



フィルム濃度変化は連続的となり、プロベラント端面像の精密な位置決定が困難になってくる。この半影により位置決定の困難さと精度低下の問題が生ずるが、半影は次の二つの要素の組合わさったものである。第一の要素は幾何学的なものであり、X線管のX線源の大きさが有限であって点ではないことで、X線源、対象物、フィルムの相対的位置で決まる。第二の要素は被写体であるプロベラントのX線吸収係数が有限であることによる。被写体の縁周辺に照射されるX線のかなりの部分は透過するか、あるいは、被写体がかかりX線に対して透明である場合にはプロベラント端面がフィルム中心よりずれるにつれてX線のプロベラント内通過距離の変化する部分が増加するためである。また、ロケット・モータ軸方向ばかりでなく、プロベラント・グレインが角柱でなくて円柱であるために、プロベラント・グレイン軸と直角方向にも濃度分布があらわれる。

第4章の実験でプロベラントの位置が最もフィルム中心からずれた場合について概算すると、プロベラント端面部の像に相当する濃度変化部分は約1.6 $\mu\text{m}$ となる。最もこの濃度変化部の小さい場合はX線管軸延長にプロベラント端面が位置している場合で、X線源の有限大きさが原因となり、フィルム上の濃度変化部は約0.5 $\mu\text{m}$ である。このような像のぼけが存在し、それは実験装置の配置によっても異ってくるが、以後の検討においてはフィルム上の像の位置

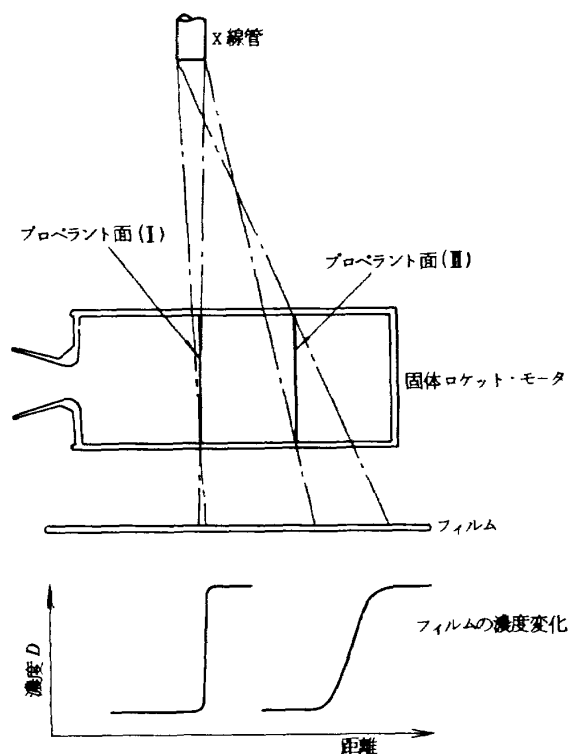


図 12 フィルム像の半影のぼけ

として統一的に濃度変化の50%の位置をとることとした。

なお、図13はフィルム粒子の状態を示したもので何の被写体も存在しないフィルムだけの場合である。X線フィルムの場合、高感度であるためにフィルムの銀粒子が大きく、後の実験結果にも示されているが、濃度分布を計測する際に滑らかな曲線を描いていない。図には比較のためにX線フィルムよりも遙かに粒子の細かい各種フィルムの状態も同時に示している。

図14は段階状プロベラント試験片にX線を照射した場合のプロベラント厚さに対するフィルム濃度変化を示している。なお、このデータはX線管軸延長の点からの距離によって濃度が低下する分の補正は行っていない。また、この場合、全体の濃度Dが小さく何も吸収体のない部分でもD=1.5とネガ濃度が薄い原因はX線管の劣化によるものと考えられる。プロベラントのみの場合にはプロベラント厚さに対して濃度の変化はほぼ比例関係に近く、この実験範囲内ではプロベラント厚さが厚くなった場合にも識別が可能であるが、厚さ6 $\mu\text{m}$ のアルミニウムをプロベラントと組合せた場合にはアルミニウムによるX線吸収のため実験データの曲線の勾配が小さく、すなわち、プロベラントの有無、または、厚さ変化による濃度差が小さくなり識別が困難になってくる。特にプロベラント厚さが薄くなるとプロベラントの存在の識別もむずかしい。しかし、6 $\mu\text{m}$ 厚

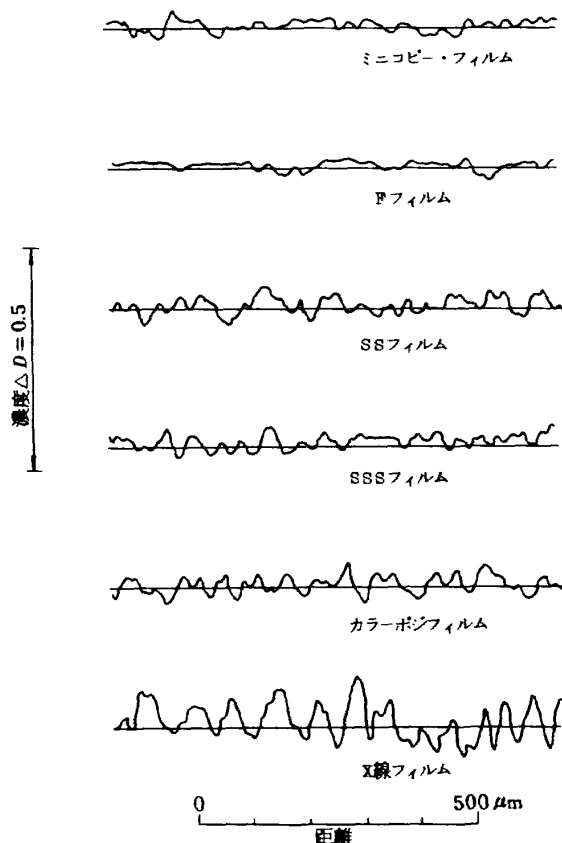


図 13 各種フィルムの粒子あれの測定例

さのアルミニウムをプロペラントと併用する場合でもプロペラント厚さを30mm以上とればプロペラントの存在する部分と無い部分との濃度差は一応0.3はとれるからプロペラント面の識別は可能である。厚さ1.4および2.8mmの鉄板をプロペラント・ブロックにとりつけた場合には、この材料によるX線吸収が大きく、ここで用いた装置の能力ではフィルムにプロペラントのX線像を見出すことはできなかった。

表3はプロペラント内に存在する細孔について、どの位の厚さのプロペラントであればどの大きさの孔まで識別できるかを求めた試験の結果である。フィルム濃度によって若干の差異は見られるが0.4φの細孔はどのような厚さのプロペラントでもその存在を識別することはできなかったが、1.5φの孔であれば厚さ50mm程度のプロペラントでも識別が可能であった。

以上の予備実験の結果から、パルスX線間歇写真装置によって実験を行なうに際しては、この装置のX線強度の制約の下では、2~3mmの肉厚をもつアルミニウム製燃焼室を用いたプロペラント直径50mm程度のモータの実験であれば、プロペラント燃焼面位置の形状の決定は可能であると判断された。プロペラント・グレイン形状としては複雑な星型グレインはフィルム像の判読が困難で、プロペラント燃焼やレストリクタの定性的な観察には使えるが、定量的にプロペラント燃焼面を決定するためには端面燃焼型あるいは、丸孔型グレインが望ましい。X線管軸まわりのX線を用いて、フィルム中心から像までの距離を小さくし、画像のぼけを小さくするためプロペラント・グレインの長さも50mm以下が望ましい。また一般にロケット・モータを可能な限りフィルムに近づけることも必要である。勿論、燃焼面決定の精度が多少低くなることを犠牲にすれば、グレイン長さはこれより長くし、また、X線源と被写体間距離も大きくして構わない。そして、フィルムは可能な限り微粒子型を使用することが望ましい。

表3 プロペラント内の細孔を識別できるプロペラント厚さの限界値

プロペラント内のキリ孔直径	肉眼で識別可能なプロペラント限界厚さ
0.4 φ	-
0.8	9~15 mm
1.5	42~54
3.0	60~72

#### 4 C\* 効率に関する実験

##### 4.1 目的

プロペラント燃焼速度の圧力依存性を示す圧力指数 $n$ へのプロペラント・グレインの寸法効果を調べた際に<sup>(7)</sup>、その原因は燃焼ガス、特にその中に含まれるアルミニウムが燃焼するに十分な滞留時間をとれないために燃焼効率が低下すること、特に低圧領域でその傾向が強く燃焼速度の低下が著しいこと、滞留時間の短い小型モータでは滞留時間の長い大型モータに比べて圧力指数が大きくなることが明らかになった。その寸法効果の実験と同一のプロペラントを用いて、燃焼ガスの燃焼室内滞留時間 $t_r$ によって燃焼効率の尺度とみなせる特性排気速度 $C^*$ が変化する状況を知るために、パルスX線間歇写真装置によって $p$ 、 $r$ 、 $C^*$ および、 $t_r$ の関係を求めることとした。

##### 4.2 実験装置

全体の装置は図1に示したもので、フィルム供給装置として装置(I)を用いた。供試ロケット・モータは図15に示す如くプロペラント・グレインは直径38φ、長さ45mm薬量85gの端面燃焼型で薬種はRS-1105である。実験の目的から燃焼室圧力は燃焼時間中一定とすることを目標としており、燃焼距離に対して燃焼面積は一定であることが必要である。また、ある瞬間において燃焼面から出た燃

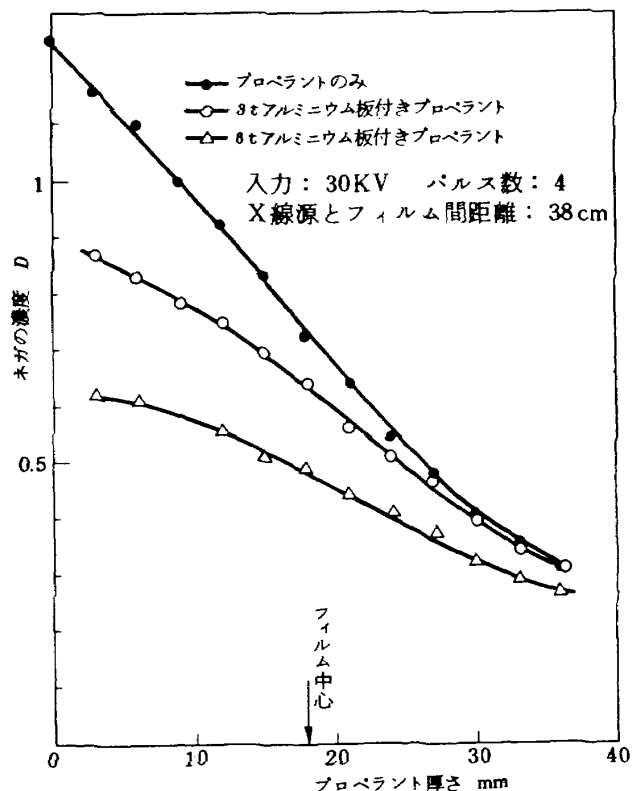


図14 プロペラント厚さとネガの濃度の関係 (フィルム中心からの距離補正なし)

焼ガスは燃焼面上のどこから出発してもノズルへ到達するまで同じ時間がかかる，すなわち，滞留時間を一義的に定めることができること，また，X線フィルム像からの燃焼面の決定が容易であること等の理由からグレイン形状として端面燃焼型を選択した。燃焼室はアルミニウム合金製で厚さは2mmである。プロペラント・グレイン後方にプラスチック製のダミー・ブロックを入れ，また，燃焼室空胴部にはベークライト製スペーサ用ライナをはめこみ，初期燃焼室空胴容積 $V_0$ を変化させた。実験の主旨から特性長さ $L^* \equiv V/A_t$  ( $V$ は燃焼室空胴容積， $A_t$ はノズル・スロート面積)が小さい場合，すなわち，滞留時間の短い場合の実験に意味があるため，初期の $L^*$ は小さく設定されている。なお，小型モータに点火装置，圧力ピックアップ，ノズルを取付けるという機構上の制約から，ノズル上流に延長管をそう入したが，この容積は燃焼室空胴容積内に算入されている。

表4にも示されているように点火装置としてNAB-6型

ペレットを用いることが多かったが初期 $L^*$ が小さいため一般に着火は著しく困難であり，着火に成功した場合においても初期圧力ピークが発生し，過大な圧力のため燃焼室

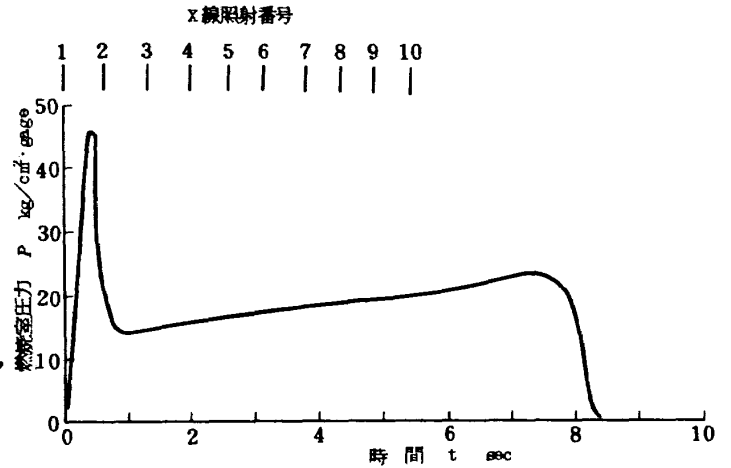


図 16 燃焼室圧力・時間曲線とX線照射信号  
実験番号 #4

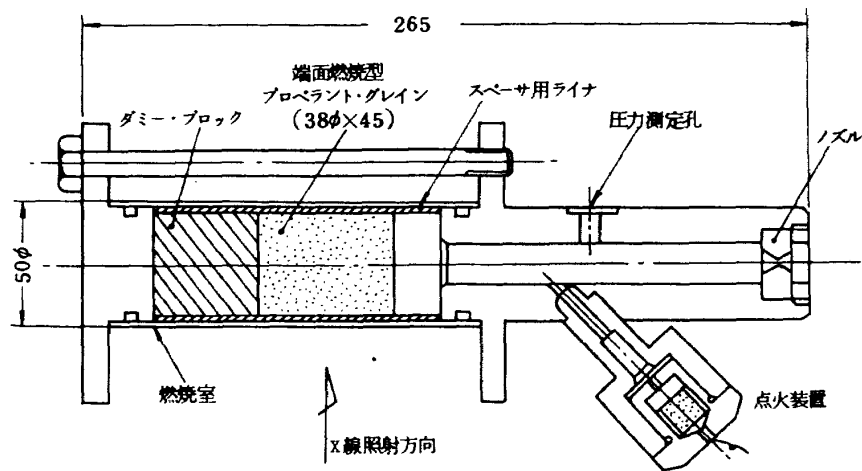


図 15 パルスX線によるプロペラント燃焼面変化の写真撮影に用いたロケット・モータ

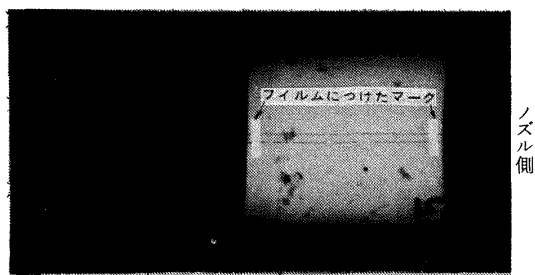
表4 実験条件と結果

実験番号	#4	#12	#14
スペーサ用ライナ長さ	50mm	10	40
ノズル・スロート直径	3.20mm	3.00	3.19
$Kn$	1340	160.4	157.5
初期空胴容積	91.7cm <sup>3</sup>	37.3	78.1
$L^*$	10.7~16.7m	5.3~12.5	9.8~16.2
点火装置	NAB-6型ペレット1個	左に同じ	延時薬粉+表面ペースト
燃焼室圧力	16~22kg/cm <sup>2</sup>	45~61	26~49
	初期ピーク大	初期ピーク大	初期ピークなし 着火遅れ0.6sec

を破壊する例が多く、低い  $L^*$  値におけるデータを十分に得ることはできなかった。

### 4.3 結果と討論

図16に燃焼室圧力・時間曲線の例を示す。着火直後に



プロペラント・グレイン 燃焼面 初期プロペラント表面 ノズル金具面

図 17 X線フィルム上の燃焼面の像  
実験番号# 4 照射番号3

大きな圧力ピークを生じているが、その後定常燃焼に移行し、徐々に圧力が上昇して燃焼が終了している。着火時に1発目、以後5.5 secまでの間にX線が合計10回照射されており、その時刻信号も図に示されている。図17はこの時得られたロケット・モータのX線像の一例である。図18は燃焼中に得られた10枚の連続X線写真であり、燃焼中のプロペラント表面はモータ軸とほぼ垂直に後退していることが示されている。プロペラントの周辺部、ライナ附近の像は、X線が通過するグレイン内距離が短くなるためフィルム濃度素地が少なくやや不鮮明ではあるが、画像からみてプロペラント全面にわたり均一な燃焼が行なわれていることが明らかである。図19は別の燃焼実験の結果であるが、10枚のフィルムを一つに合成して画いてある。

これらX線フィルム像から実際のプロペラントの刻々の位置を定める較正のために、燃焼実験前に同一のモータを

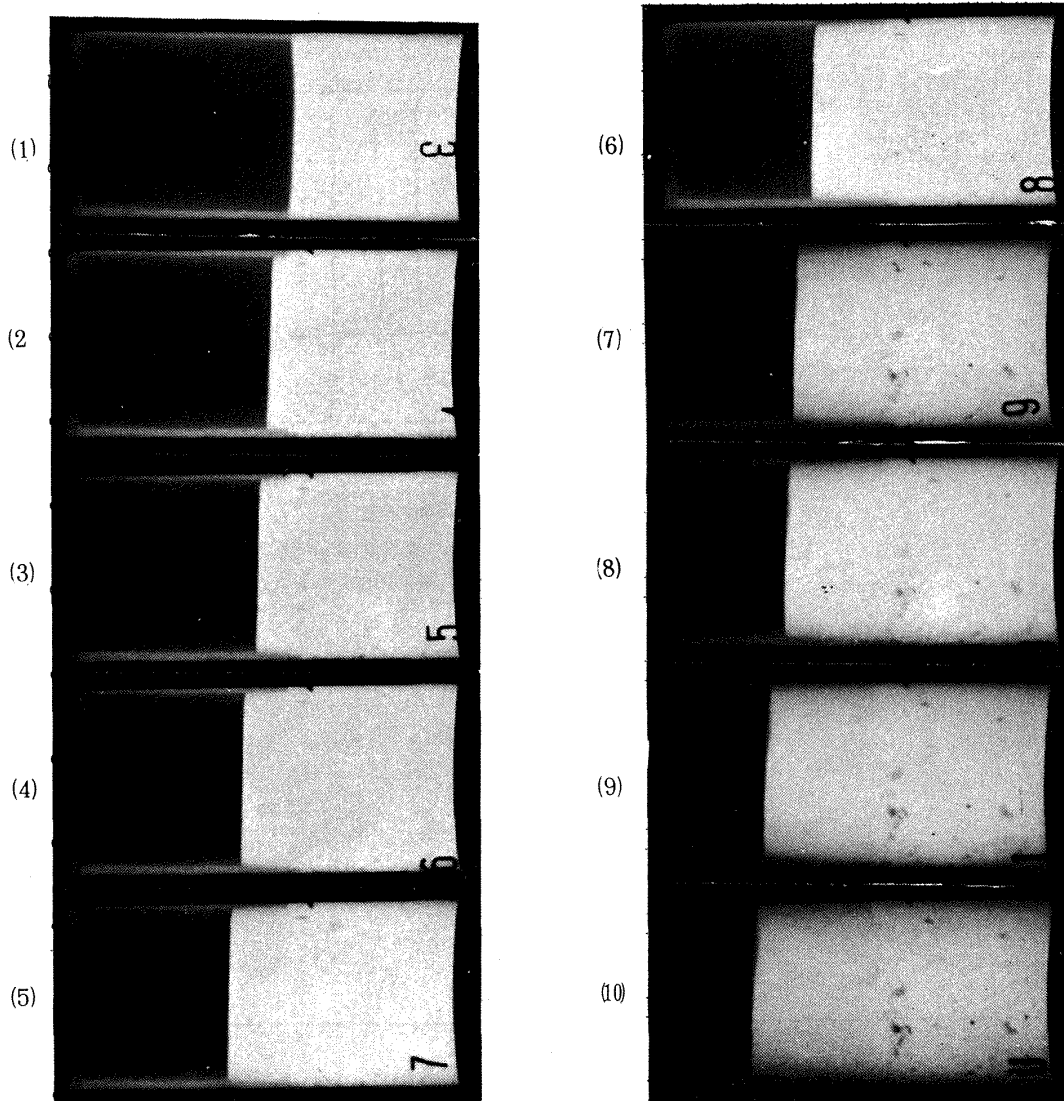


図 18 燃焼面像の変化 実験番号# 4

用いプロベラント・グレインを燃焼室内の既知の位置に置いてX線像を撮り、真のプロベラント表面位置とフィルム上の像の位置の関係を求め最小自乗近似により校正曲線を得た。燃焼実験より得られたフィルムから、その時点におけるプロベラント燃焼面を決定するためのフィルム像の位置決定は次に示す方法で行なった。

図20はフィルム濃度測定器によって測定された濃度・距離曲線であり、図17に例示したフィルムにおいてノズルから燃焼室内空洞（燃焼ガス）までと、燃焼室空洞（燃焼ガス）からプロベラント・グレインまでのモータ軸上の濃度分布を示している。この二つの遷移域では濃度変化が大きく、その変化分の50%の点をもって、それぞれ、ノズル端面、および、プロベラント燃焼面とした。

フィルム上の二つのマーク間の長い距離は別途、日本光学精製の工具顕微鏡により測定し、これらの距離の和を先の校正曲線で補正したものが基準面（ノズル端面）から燃焼面までの距離である。目視のスケールによる測定では距離のばらつきは最大0.3mmに達するが、この方法によると50μmのばらつきで面の位置測定が可能である。

この実験で得られたデータは、このようにある時刻  $t_j$  におけるプロベラント燃焼面の位置  $t_j$  と燃焼室圧力  $P_j$  である。燃焼面積  $A_j$  はプロベラント燃焼面がモータ軸と常に垂直で凹凸も無視できるとして幾何学的に求め一定とした。燃焼室空洞容積  $V_j$  はノズル、スロート部より上流の容積とし  $A_j$  と  $t_j$  から求めている。これらの諸量がパルス毎に得られているので、それらから時刻  $t_j$  と  $t_{j+1}$

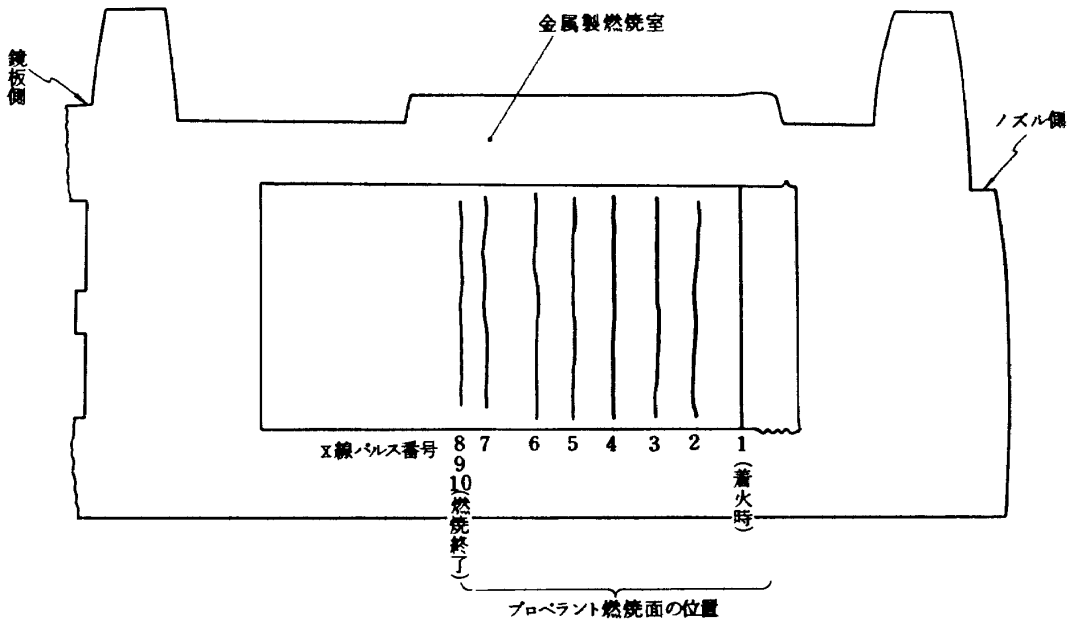


図19 プロベラント燃焼面位置の変化の測定例 (10枚の画像より合成, 実験番号#12)

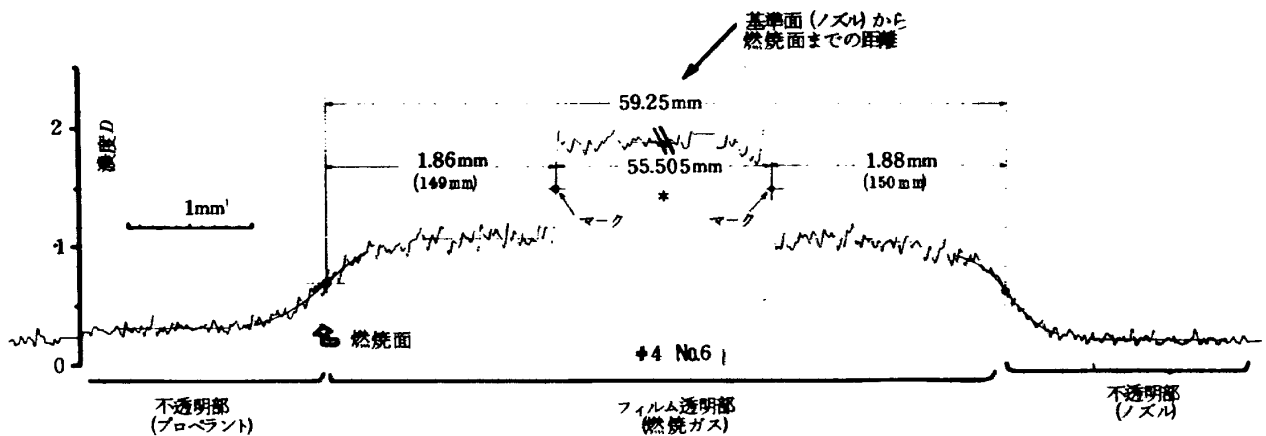


図20 X線フィルムの濃度分布測定例  
\* マーク距離は工具顕微鏡により測定

の間の短時間  $\Delta t = t_{j+1} - t_j$  内の燃焼特性の平均値は次式により求められる。

$$\bar{\tau}_{j,j+1} = \frac{x_{j+1} - x_j}{t_{j+1} - t_j} \quad (1)$$

$$\bar{P}_{j,j+1} = \frac{1}{2}(P_j + P_{j+1}) \quad (2)$$

$$\bar{A}_{bj,j+1} = \frac{1}{2}(A_{bj} + A_{bj+1}) \quad (3)$$

$$\bar{V}_{j,j+1} = \frac{1}{2}(V_j + V_{j+1}) \quad (4)$$

$$\bar{C}_{j,j+1}^* = \frac{gA_{bj} \cdot \bar{P}_{j,j+1}}{\tau \bar{A}_{bj,j+1} \cdot \bar{\tau}_{j,j+1}} \quad (5)$$

$$\bar{T}_{fj,j+1} = T_{fa} \left( \frac{\bar{C}_{j,j+1}^*}{C_{ib}^*} \right)^2 \quad (6)$$

$$\bar{t}_{rj,j+1} = \frac{M \bar{C}_{j,j+1}^* \cdot \bar{V}_{j,j+1}}{g J R A_{bj} \cdot \bar{T}_{fj,j+1}} \quad (7)$$

なお、 $\tau$  は燃焼速度、 $T$  は燃焼ガス温度、 $\tau$  は比熱比（理論値）、 $T_{fa}$  は断熱火炎温度（理論値）、 $M$  はガスの分子量（理論値）、 $J$  は熱の仕事当量、 $R$  は普遍ガス定数であり、 $\bar{\tau}_{j,j+1}$  は時刻  $t_j$  と  $t_{j+1}$  の間の  $\Delta t$  時間における平均燃焼速度を意味する。

このようにして得られた燃焼速度と燃焼室圧力の関係を図21に●印で示す。なお、燃焼速度の測定誤差は約3%と推定される。この実験のプロペラント・グレインはストランド試験片より若干100S型グレインに近い型式であり、この燃焼速度・圧力の関係は圧力指数へのグレイン寸法効

果の検討からほぼ予想されていた通りである。図22は特性排気速度比  $C^*/C_{ib}^*$  と滞留時間  $t_r$  の関係を示している。 $C^*/C_{ib}^*$  が1より僅かに大きい値を示す時があるが、これは理論値  $C_{ib}^* = 1418 \text{ m/s}$  が低目であるためと思われる。高圧、中圧、低圧では異なる傾向があらわれている。すなわち、圧力が45~60 kg/cm<sup>2</sup> の高圧の実験では  $t_r$  に対して  $C^*/C_{ib}^*$  がほぼ一定であり、 $t_r$  の低下につれて僅かに減少している傾向が見られる。一方、圧力が15~20 kg/cm<sup>2</sup> の低圧の例では、 $t_r$  の狭い範囲しかデータが得られてはいないが、 $t_r$  の減少によって  $C^*$  が急激に低下しているのが示されている。これは、 $t_r \approx 20 \text{ ms}$  においてもアルミニウムの燃焼が不完全なためであろう。また同一の  $t_r$  に対して圧力の低下と共に  $C^*$  が減少する傾向が見ら

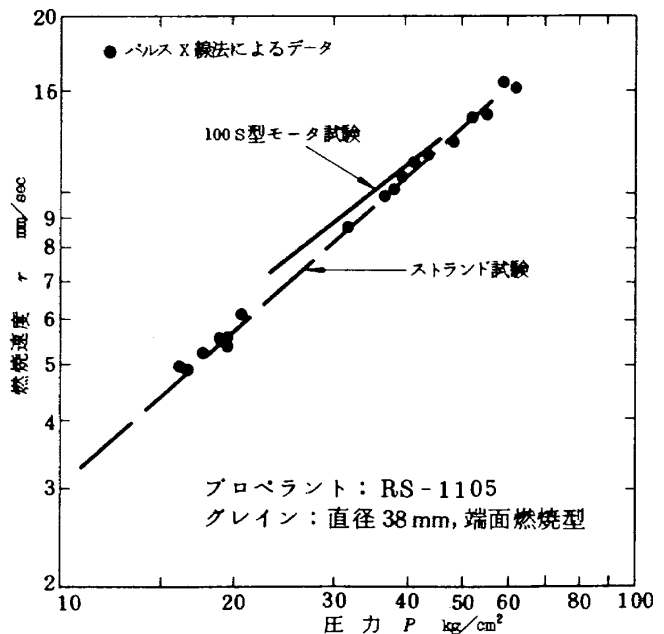


図 21 パルスX線間歇写真法によって得られた燃焼速度のデータ

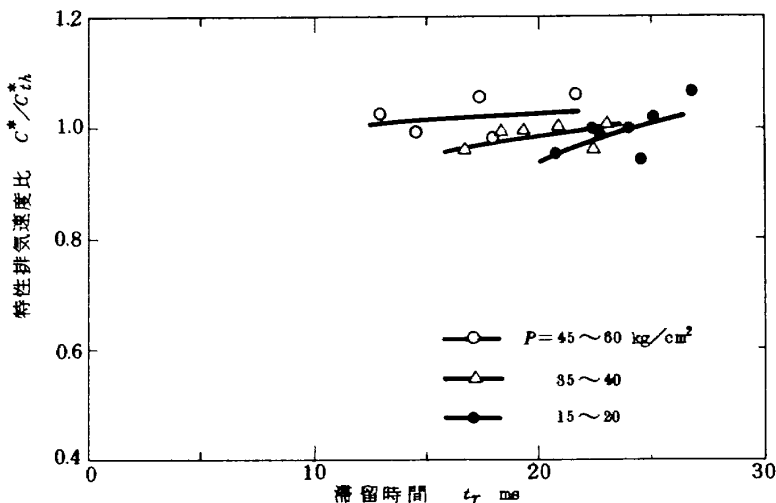


図 22 パルスX線間歇写真法により求めた特性排気速度と滞留時間の関係

プロペラント: RS-1105  
グレイン: 直径 38 mm, 端面燃焼型

れる。

これらの傾向はプロペラントに含まれているアルミニウムの燃焼の不完全さに主に起因すると考えられる。Brown<sup>(8)</sup>によれば平均滞留時間が10 $\mu$ m以下では未燃のアルミニウムがノズルから排出される割合が激増し、Scortia<sup>(8)</sup>によれば、その結果、固体ロケット・モータの比推力が激減する。また、Davis<sup>(9)</sup>は70 $\text{kg}/\text{cm}^2$ までの圧力範囲においては、アルミニウムの燃焼時間は圧力の増加と共に減少することを報告している。そして、これらの報告は全てこの実験結果と傾向を一にするものである。

このように滞留時間によって、また、圧力によって $C^*$ 効率が変化するために図16に示した燃焼室圧力が時間と共に漸増していると考えられる。すなわち、X線像より燃焼面積は燃焼時間中にわたって一定、ノズル・スロート直径は燃焼前後において0.01 $\text{mm}$ のデータまで変化していないことを考えると、圧力時間曲線が漸増型である理由は、プロペラント単位流量当り発生する圧力に比例する $C^*$ が時間と共に向上する以外には考えられないし、事実、実験結果もこれを裏書きしている。 $C^*$ の向上によって圧力が上昇する割合については、このプロペラントでは圧力指数が0.85と極限値の1に近いので圧力は $C^*$ の変化によって大きな影響を受ける。概算によれば圧力が15から20 $\text{kg}/\text{cm}^2$ まで $C^*$ の影響のみで変化するためには、 $C^*$ は4%変化すればよい。一般に、小型低圧型固体ロケット・モータの実験においてグレインが中立型にも拘らず、燃焼室圧力・時間曲線が全体にわたって、あるいは、燃焼初期に漸増型を示すことがあるが、その理由は上記の如く考えられよう。この現象は、プロペラント内のアルミニウム粒子の着火遅れが大きく、粒子の燃焼時間が長い場合に顕著であるとされるから、アルミニウム粒子まわりのガス温度、圧力、ふんい気の酸素濃度およびアルミニウム粒子の大きさが、これらに影響すると考えられる。

## 5 考 察

このパルスX線間歇写真法には種々の応用が考えられるが、固体ロケットについていえば0.1 $\text{sec}$ 以上の時間々隔における準定常燃焼現象であればその応用範囲は広い。装置の制約から大きな固体ロケット・モータへの適用、高精度測定、および速い過渡現象には必ずしも適当ではないが、次のような固体ロケット燃焼に関する研究に用途が考えられる。

### (1) プロペラントの侵蝕燃焼

プロペラント・スラブをガス発生器の後流にセットし、その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、変形の状況を知ることができる。

### (3) プロペラント・グレインの形状変化

球型ロケットのグレインの如く複雑な形状の場合には、この方法では像が重なりあうため適用しにくいだが、グレインの基本型(鋭角部、谷部等)における燃焼面形状の変化を観測することは可能である。

### (4) 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、それを観察できる。

### (5) 比推力の瞬時値

第4章実験において、圧力と同時に推力測定を行えば比推力の瞬時値が得られる。

### (6) プロペラント・グレイン欠陥まわりの燃焼

グレインに孔、割れ目等の欠陥が存在する場合の燃焼変化を明らかにできる。

### (7) イグナイタの挙動

ベレット、装薬の消費のしかた、不具合等を観察できる。

### (8) 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明らかにすることができる。

### (9) アルミニウムおよび酸化物の集塊化現象

プロペラントの燃焼に伴ってアルミニウム粒子がプロペラント表面あるいは空胴部に集塊化し、あるいは、ノズルへアルミナが附着する現象を観察できる。

### (10) スピン燃焼固体ロケットの挙動

パルスX線の露出時間が短いため、高速回転している固体ロケット・モータも静止している如く撮影できるから、上記の諸現象を非接触式で測定・観測できる。

## 6 む す び

パルスX線発生装置とフィルム供給装置等から構成されるパルスX線間歇写真装置が固体ロケットの燃焼に関する研究に有用であることを示した。アルミニウム製燃焼室内のプロペラントの燃焼面形状の変化、位置の測定を行ない、それらから種々の燃焼特性の瞬時値が求められた。大型装置により大型固体ロケット・モータの高精度測定、観測が可能であるが、現設備では直径50 $\phi$ までの固体ロケット・モータの燃焼状況を10駒の画像に最高毎秒8駒の速度で記録することができる。

## 参考文献

(1) 五代富文, 藤原勉, 清水盛生, 種村利春, 伊藤克弥; 推力中断型固体ロケット用プロペラント組成と急速減圧燃焼中断性との関係, 航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-461, 1976年7月

(2) F.E.Culick; Remarks on Extinguishment and Response Function for a Burning Solid Propellant, AIAA Journal, vol. 7, No. 7, July 1969, p. 1403-1404

(3) 五代富文, 清水盛生, 伊藤克弥, 西村久男, 種村利春, 藤原勉; 推力中断型固体ロケット用プロペラントの消火圧力, 航空宇宙技術研究所報告, NAL-TR-341, 1973年10月

(4) O.Molnar; Erosive Combustion of Propellant Slabs, AIAA paper 72-1108, AIAA/SAE 8th Joint Propulsion Specialist

Contekce, New Orleans, Nov.1972

(5) Field Emission Corporation; Fexitron Pulsed X-ray Systems, Introduction Manual, May 1964

(6) Chemical Rubber Publishing Co.; Handbook of Chemistry and Physics, 44th Edition, p.2767, 1963

(7) 五代富文, 清水盛生, 伊藤克弥, 種村利春, 藤原勉; 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, 航空宇宙技術研究所報告刊行予定

(8) NASA; Solid Propellant Selection and Characterization, NASA SP-8064, p20-21, 1971.

(9) A.Davis; Solid Propellants; The Combustion of Particles of Metal Ingredients, Combustion and Flame, vol.7, Dec. 1963.



---

## 航空宇宙技術研究所報告 543号

昭和53年9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 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

**Printed in Japan**