

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-91

固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)

五代富文

1965年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- TR-70 汎用飛行シミュレータ設備の計画, 構造および特性
Design, Construction and Characteristics of Flight Simulator at National Aerospace Laboratory 1965年1月 松浦陽恵, 樋口一雄
池谷光栄, 堀川勇壮
村上力, 百名盛之典
三好範子, 岡部正典
- TR-71 塑性の三方向せん断理論
塑性変形による異方性
塑性流動に及ぼす中間主応力の影響
応力状態と塑性変形の形
Three-Shear Theory of Plasticity
Anisotropy Due to Plastic Deformation
Influence of Intermediate Principal Stress on Plastic Flow
Strain Ratio Relationship in Plastic Deformation 1964年7月 中西不二夫, 佐藤和郎
- TR-71T Three-Shear Theory of Plasticity
Anisotropy Due to Plastic Deformation
Influence of Intermediate Principal Stress on Plastic Flow
Strain Ratio Relationship in Plastic Deformation
Internal Shearing Resistances in the Three Shear Theory of Plasticity September 1964 Fujio NAKANISHI
Yasuo SATO
- TR-72 補助翼バズに関する一実験
Some Experiments on Control-Surface Buzz 1965年1月 中村泰治, 田辺義一
- TR-72T Some Experiments on Control-Surface Buzz November 1964 Yasuharu NAKAMURA
Yoshikazu TANABE
- TR-73 軸対称凝み点付近の溶融層の安定性
Stability of the Melted Layer near the Axisymmetric Stagnation Point 1964年11月 相原康彦
- TR-74 遷音速パネルフラッタの研究
The Experimental and Theoretical Studies of Transonic Panel Flutter 1964年11月 石井孝雄, 柳沢三憲
- TR-75 統計流体力学の初期値問題について
On the Initial-value Problem in Statistical Hydromechanics 1964年12月 細川 巖
- TR-76 高速軸流圧縮機の研究 (IV)
An Investigation of High Speed Axial Flow Compressor (IV) 1965年1月 大山耕一, 松木正勝
西脇英夫, 岩部柱相
片山泰治
- TR-77 Galerkin 法の収束性について
On the Convergence of Galerkin's Method 1965年1月 鳥海良三
- TR-78 二次元準線型双曲系の特性曲線法による数値解法
Characteristic Method for the Numerical Solution of Two-Dimensional Quasi-linear Hyperbolic Systems 1965年1月 三好 甫
- TR-79 引張りまたは圧縮をうける四角弾性平板の大振幅振動の影響について
Influence of Large Amplitude on Flexural Vibrations of Rectangular Elastic Plates under Initial Tension or Compression 1965年1月 田寺木一, 古関昌次
泉 日出夫
- TR-80 変分法直接解法において解に及ぼす束縛の数値的影響
Numerical Effect of Constraints in Calculus of Direct Variational Method 1965年1月 埜 武敏, 越出慎一
- TR-81 FRP コーティングの断熱特性
Thermal Insulation Characteristics of FRP Coating 1965年1月 竹中幸彦, 江川幸一
小川鉦一
- TR-82 多段軸流圧縮機の部分負荷特性の簡易計算法
A Simple Method of Calculating the off-Design Performance of Multi-Stage Axial-Flow Compressor 1965年2月 松木正勝, 藤井昭一
- TR-83 亜音速流中のパネルフラッターとダイバージェンス (I) —非圧縮流理論—
Theoretical Study of Two-Dimensional Panel Flutter and Panel Divergence in Subsonic Flow (I)
—Incompressible Flow Case— 1965年2月 石井孝雄

固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)*

五代 富文**

Flame Propagation into the Gap of Solid Propellant Grain (I)

By Tomifumi GODAI

The flame propagation into a narrow gap, which is prepared perpendicular to the prime burning surface of solid propellant grain has been experimentally investigated using the test specimens of polyester-ammonium perchlorate composite propellants.

Experimental results show that the flame propagates from the original burning surface into a gap when its width is larger than some critical value and vice versa. This means that there always exists the critical value for the width of gap which is the threshold of propagation and non-propagation of flame into it. The critical value is primarily the function of linear burning rate and the overall mechanism of flame propagation into a gap of solid propellant grain will be explained with the quenching theorem.

It is expected that further work will give a useful measure to the setting of standards of nondestructive testing of solid propellant grains and motors.

1. 緒 言

固体ロケット・モーターは、圧力容器である燃焼室内に固体プロペラントを充てん、燃焼させ、燃焼室の一端に付けたノズルを通して燃焼ガスを排出し、それにより、推力を発生する。燃焼は固体プロペラントの露出面で行なわれ、規定の燃焼室圧力をうるために、ノズルのスロート面積と、プロペラントの燃焼面積が、あらかじめ設定されている。ところが、プロペラントの製造、取扱方法が正しくなかったり、プロペラント形状の設計や、プロペラントの機械的性質が悪くて、プロペラント自体に割れ目がいったり、燃焼を防止するためにプロペラントに接着されているレストリクターとプロペラントとの間の接着面がはがれたりする場合がある。この場合、燃焼面積が設計値より増加するので、燃焼室圧力が予想以上に増加し、ときには、燃焼室の許容圧力をこえ、燃焼室を破壊することにもなる。したがって、このような事故を起こさないために、プロペラント内の割れ目や、レストリクターのはがれを、あらかじめ検出しておかなければならない。現在、固体ロケ

* 昭和40年6月12日受付

** ロケット部

ット・モーターの非破壊検査の手段として、一般に、X線およびガンマー線等が使用されている。これらの検査法では、被検査物大きさの 0.2% 程度の欠陥が内部にある場合、たとえば、厚さ 500 mm の固体プロペラント内の直径 1 mm の孔や気泡が検出できる。しかしながら、割れ目や、プロペラントとレストリクターの間のはがれは、孔や気泡と比べて、検知することがはるかにむずかしい。また、割れ目やレストリクターのはがれのための燃焼面積の増加も、孔や気泡と比べて、著しく大きいのが普通である。プロペラント内の割れ目やレストリクターのはがれが、固体ロケット・モーターの燃焼室圧力の異常上昇と関係があると、従来から考えられてはいたが、実際に、この研究が行なわれた例はない。どの程度の広さの割れ目まで、非破壊検査で検出すべきであるかも現在までのところ調べられていない。割れ目が十分に広ければ、もちろん割れ目の内面でも燃焼が行なわれるが、割れ目の幅が十分に狭くなっても、割れ目の内面で燃焼が行なわれるかどうかは明らかでない。

本報告では、ポリエステル系コンポジット・プロペラントを用いて、固体プロペラントの割れ目内部の着火、すなわち、割れ目内への火炎伝ばを実験的に調べた。

2. 実験方法

この実験に使用したプロペラント試験片の形状を図1に示す。一辺 5 mm の正方形断面をもつ長さ 25 mm のプロペラント 2 本を、わずかな間隔を隔てて組み合わせ、割れ目に相当する隙き間

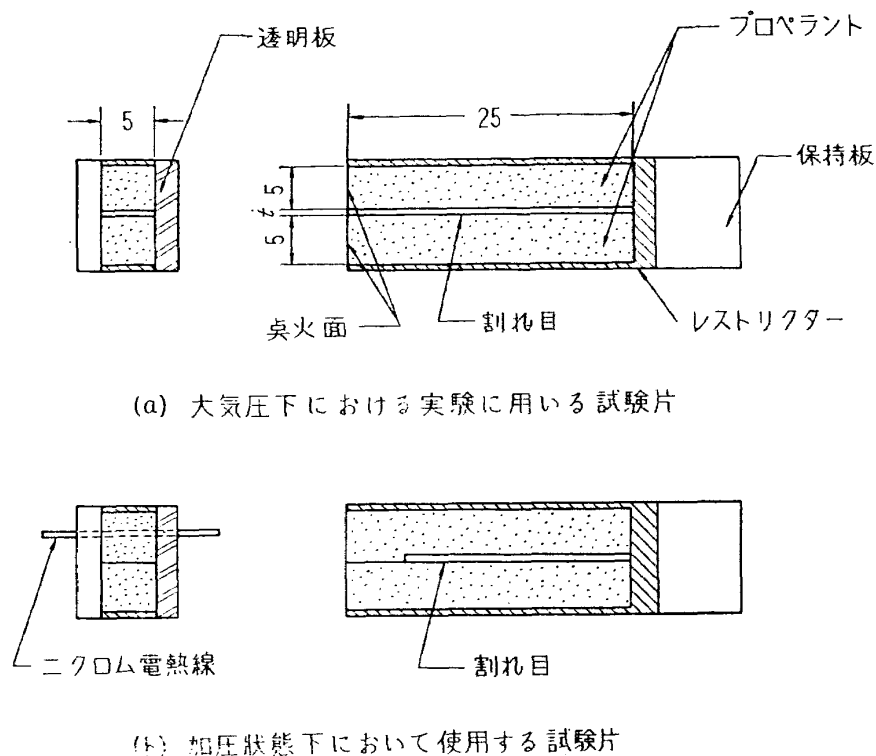


図1 プロペラント試験片の詳細

を作る。ポリエステル樹脂の燃料結合剤と、過塩素酸アンモニウムの酸化剤よりなるコンポジット・プロペラントを、精密に機械加工した後、ベークライト板と塩化ビニル板ではさみ、接着剤で固定し割れ目の間隙を保つ。間隙の測定は厚みゲージによった。硬質のポリエステル系コンポジット・プロペラントを用いることによって、割れ目間隙の正確な試験片を製作することができる。表面と裏面の板によって、端面からの外部の影響は無視でき、また割れ目間隙に比べて、割れ目の幅が十分に広いので、この試験片を二次元模型と見なすことができよう。

点火は、一般には電熱線をプロペラントの点火させるべき面に接触させて行なった。ただし、加圧状態下における実験の場合は、図 1 (b) に示すごとく、埋めこんだニクロム線で、プロペラントを点火させた。

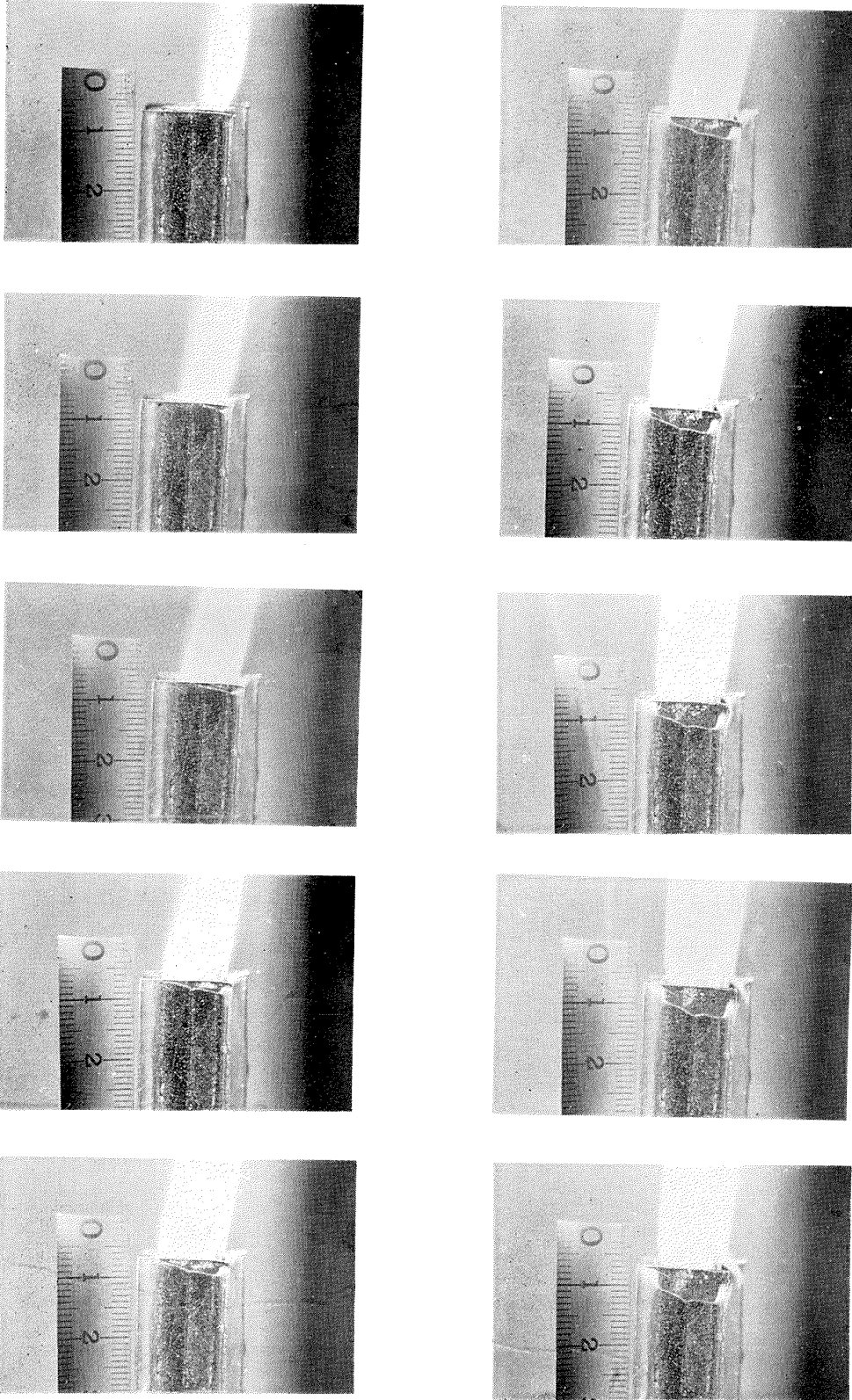
同一組成のプロペラントを用いて、割れ目間隙のみ変えた試験片を作り、同一条件下で、10 ないし 40 個を、点火、燃焼させる。燃焼面が割れ目に直角にのみ進み、割れ目の内面に着火せず、あたかも、割れ目のない場合と同じように燃焼する場合を「割れ目内へ火炎が伝ばしない」と呼ぶ。これに反して、燃焼が初期の点火面と平行に進むばかりでなく、割れ目の内面にも着火、燃焼する場合を「割れ目内へ火炎が伝ばする」と呼ぶことにする。割れ目内へ火炎が伝ばする場合には、透明板を通して、その様子を観察できるし、また、激しい燃焼音を伴うので、伝ばしたか、しないかの判定は一般に容易である。図 2 (a), (b) に、それぞれ、割れ目内へ火炎が伝ばしない場合と、する場合の代表例を示す。

実験条件としては、次に示す各パラメータを変えて、火炎が割れ目内へ伝ばする、しないの限界の割れ目間隙 l^* を求めた。なお、大気圧下の実験では、試験片を垂直に立てて、点火面を上面としたが、加圧状態下の実験では、試験片を水平に設置した。予備実験の結果からみると、試験片の姿勢は l^* に影響を及ぼさない。実験のパラメータとしては、次に示すとおりである。

- (1) プロペラントの初期温度
- (2) プロペラントの環境圧力
- (3) プロペラントの組成

プロペラントの初期温度は、実験全般にわたって、すべて室温 (約 20°C) に保ち、初期温度の影響を調べる実験のときのみ、精密恒温槽を用いて、+25°C, 0°C および -25°C に試験片温度を保った。

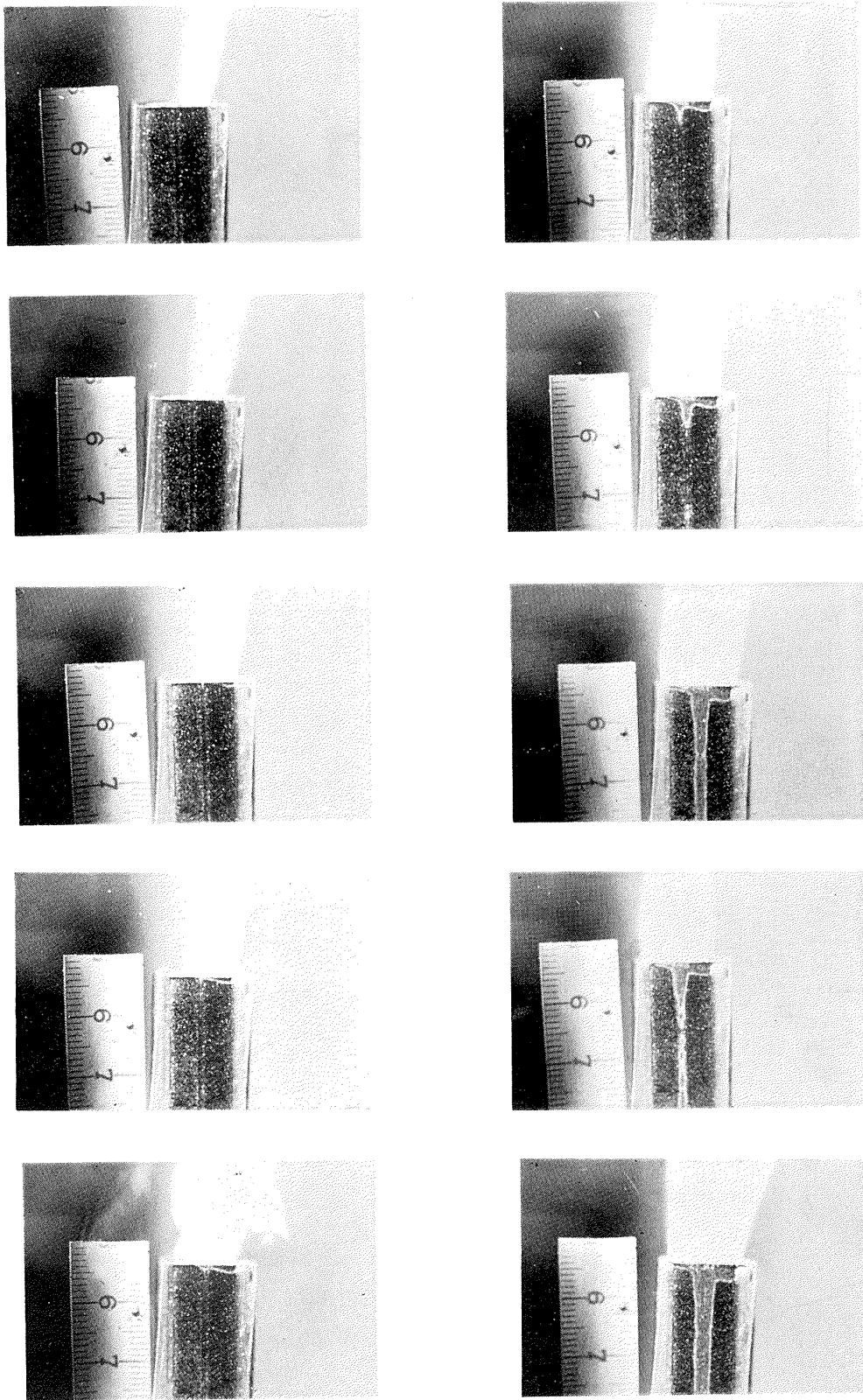
プロペラントの環境圧力は、プロペラント試験片をのぞき窓のついた加圧チャンバー内に設置して点火、燃焼させる際の加圧用空気の圧力であり、0~3.5 kg/cm² G の範囲内で調整した。この加圧チャンバーは容積が小さいので、プロペラント試験片の燃焼が始まると、最初の設定圧力より圧力が上昇する恐れがある。したがって、火炎が割れ目内へ伝ばする直前の圧力を正確に求めるために、試験片形状を図 1 (b) のごとくした。火炎が割れ目内へ伝ばする場合には、圧力は、



1~5

6~10

図 2 (a) 割れ目内へ火炎が伝ばしない場合の燃焼状況
 撮影コマ数 毎秒約 1.5 コマ



1~5

6~10

図 2 (b) 割れ目内へ火炎が伝ばする場合の燃焼状況
撮影コマ数 毎秒約3コマ

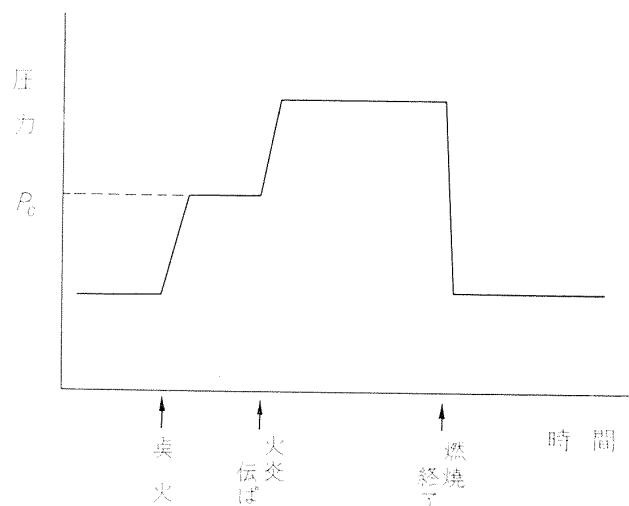


図 3 割れ目内へ火炎が伝ばした場合のチャンバー内圧の時間的变化

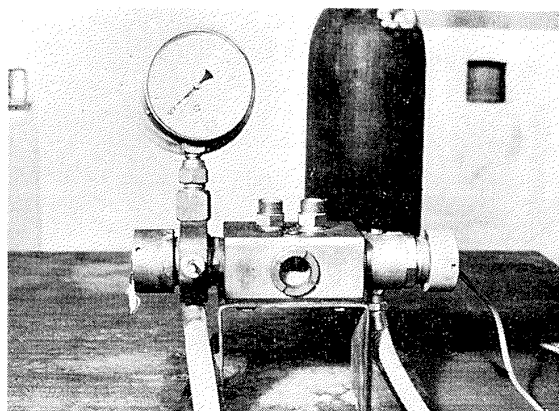


図 4 加圧チャンバー

図 3 に示すように、点火前の空気圧力、割れ目のない面の燃えるときの燃焼圧力、さらに、割れ目内に着火した後の燃焼圧力と 3 段階に上昇する。この 2 段階の圧力を、プロペラントの環境圧力として測定した。割れ目内へ火炎が伝ばしない場合には、この 3 段階の圧力は現われない。また、加圧チャンバー内での実験の場合、のぞき窓の燃焼ガスによるよごれを防止するために、プロペラント試験片と平行に空気を流している。予備実験の結果から見ると、この流れの t^* への影響は見られない。加圧チャンバーの概要は図 4 に示す。

温度および圧力の影響を調べる際に用いるプロペラントの組成は、過塩素酸アンモニウム (AP) 75%，平均粒径 $80\sim 100\mu$ である。組成の影響を調べるために用いられたプロペラントの組成は表 1 に示す。表 1 に示してある過塩素酸アンモニウムの粒度は、顕微鏡を用いて測定した。その粒度分布の結果を図 5 (a), (b), (c) に示す。粗粒子、中粒子、細粒子の平均直径は、それぞれ 477 ， 162μ および 23.6μ である。

添加物として、一般のプロペラントには、炭素粉が 0.13% 混入されているが、炭素粉の影響を調べるために、炭素粉をまったく含まない組成の試験片も作製した。なお、すべてのプロペラント

にはアルミニウム粉末は含まれていない。

表 1 プロペラントの組成

番 号	NH ₄ ClO ₄ 含有率 重量 %	NH ₄ ClO ₄ 粒度 分布(重量配分)	ポリエステル樹脂 含有率 重量 %	炭 素 粉 含有率 重量%
APE-7	80	細粒子	20	0.13
// 8	80	中粒子	20	0.13
// 9	80	粗粒子	20	0.13
// 1	75	細粒子	25	0.13
// 13	75	細粒子	25	0
// 4	75	細粒子 $\frac{1}{2}$ + 中粒子 $\frac{1}{2}$	25	0.13
// 11	75	中粒子	25	0.03
// 3	75	粗粒子	25	0.13

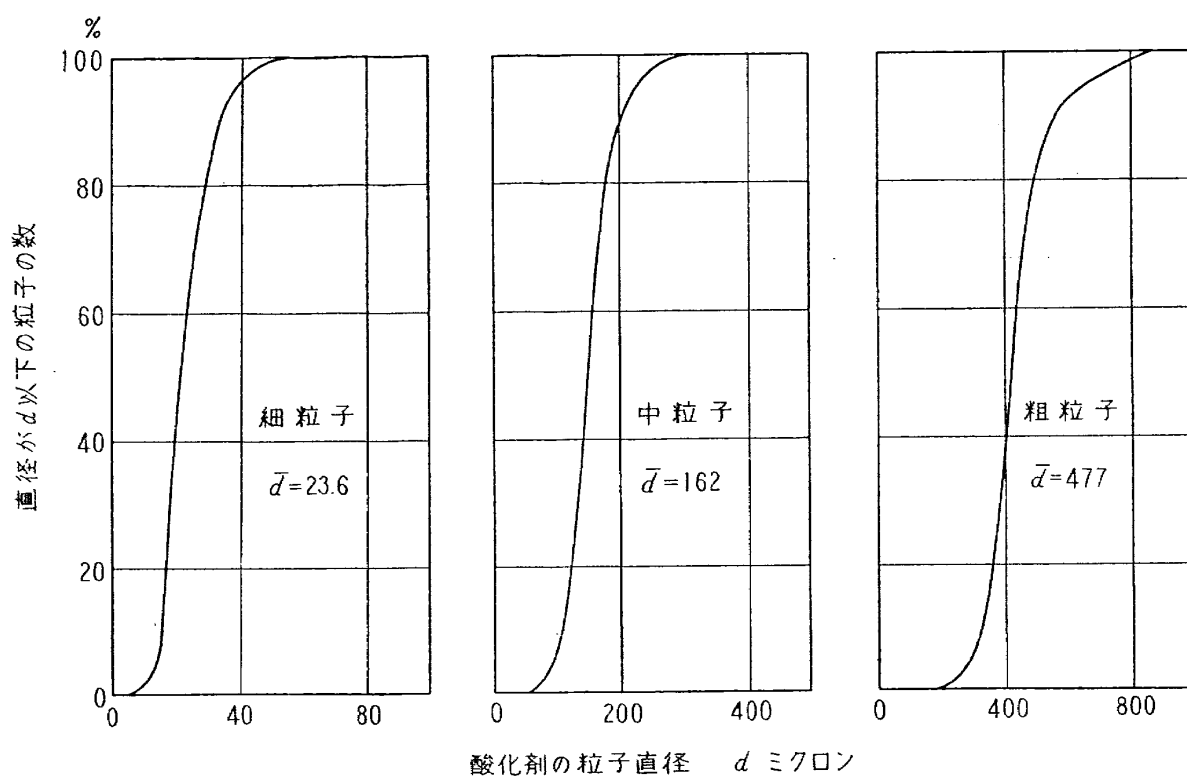


図 5 酸化剤の粒度分布

3. 実験結果

プロペラントの初期温度の限界隙き間への影響を図6に示す。図中○印は、割れ目内へ火炎が伝ばする場合を、●印は、割れ目内へ火炎が伝ばしない場合を示している。±25°C, 0°C, -25°Cのいずれの場合も、割れ目の隙き間が、0.25 mm 以上に広くなると、割れ目内へ火炎が伝ばする。しかし、隙き間が、0.20 mm 以下の狭い割れ目では、火炎が内部へ伝ばしない。すなわち 0.20~

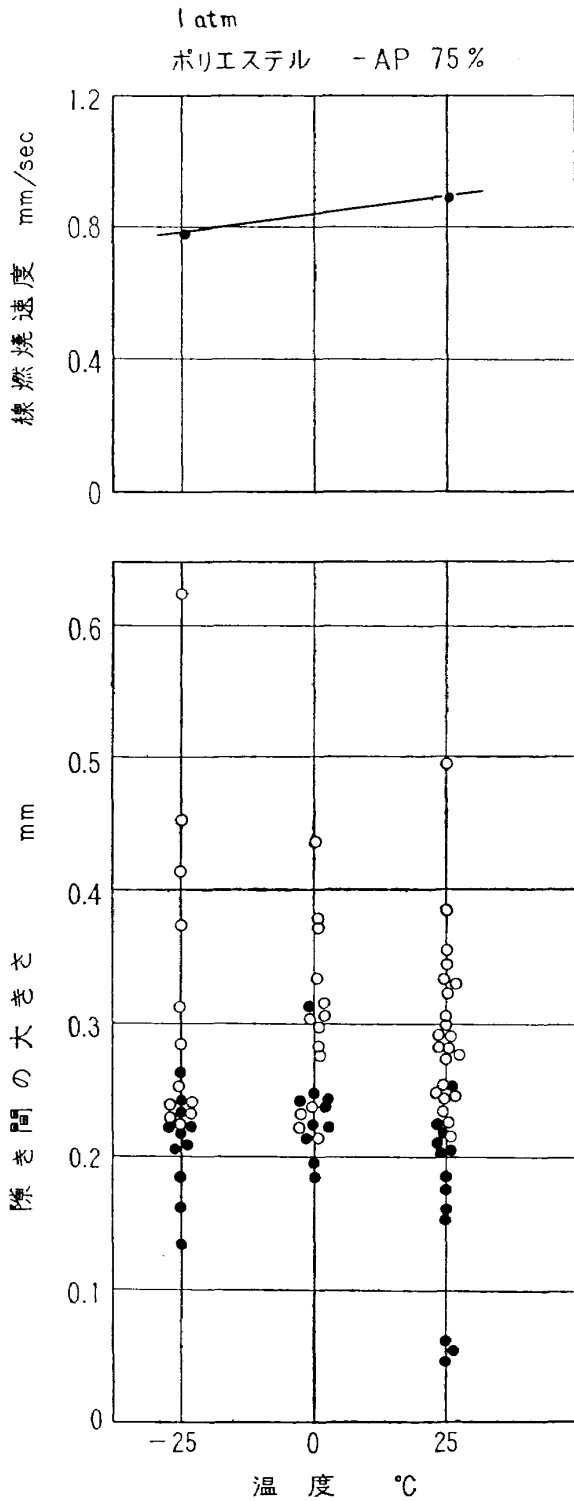


図 6 割れ目内火炎伝ばへのプロペラント初期温度の影響

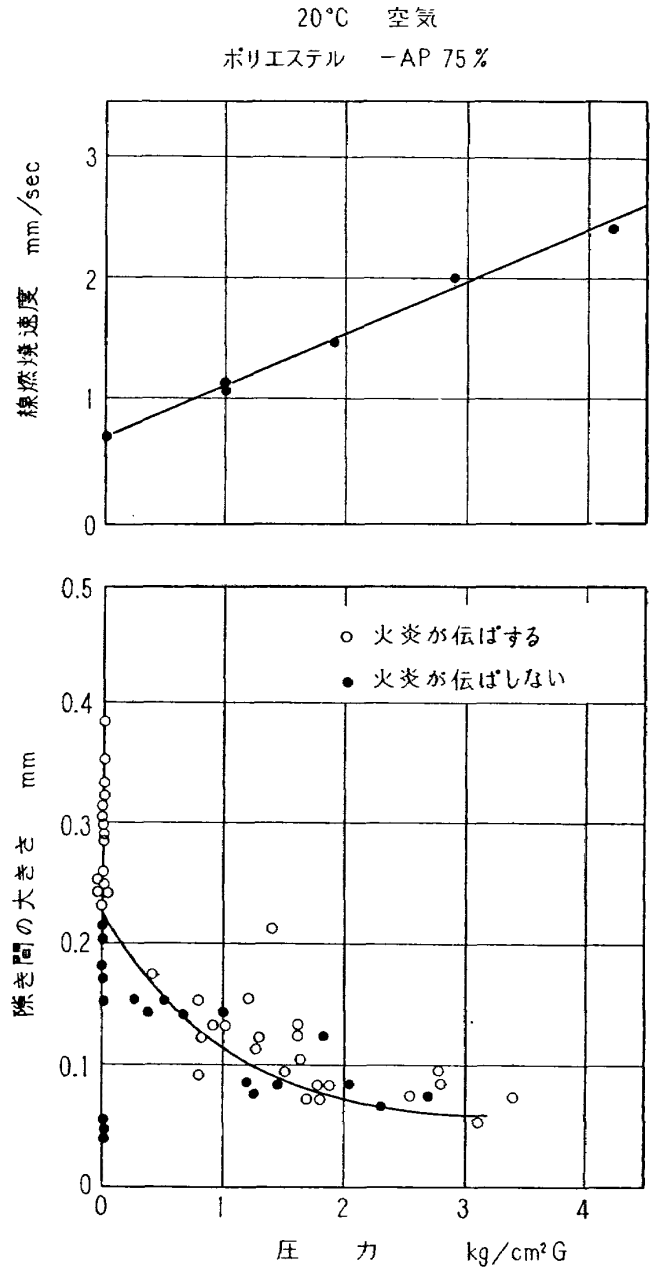


図 7 割れ目内火炎伝ばへの圧力の影響

0.25 mm の間に、限界隙き間が存在することがわかる。限界隙き間は、一般にあるひろがりを持っているが、これは、プロペラント組成の不均一ばかりでなく、割れ目形状、大きさの不正確や、プロペラントの表面の状態等が原因となっているのであろう。図 6 が示すように、限界隙き間 t^* に対して、プロペラント初期温度の影響は少なく、温度の低いほど、多少 t^* は増加する傾向があ

る。一方、線燃焼速度は温度が低下するほど減少する。

割れ目内火炎伝ばへの圧力の影響を図 7 (a) に示す。限界隙き間を圧力の関数として、はっきりと一曲線で示すことは、測定点のばらつきのためにむずかしいが、圧力が増加するにつれて限界隙き間が減少する傾向は明らかである。すなわち、圧力がふえるにつれて、狭い割れ目内へ火炎が伝ばしやすくなる。図 7 (b) には、線燃焼速度の圧力による変化を示す。

プロペラント組成の限界隙き間への影響を図 8, 9 に示す。図 8 は、添加物としての炭素粉の限界隙き間への影響を示したものである。粒子の細かい過塩素酸アンモニウムを 75% 含む組成を母材として、炭素粉をまったく含まない白色のプロペラントと、0.13% の炭素粉を含むために黒色を呈するプロペラントでは、限界隙き間は変わらないことを示している。

図 9 は、限界隙き間に対する過塩素酸アンモニウムの粒度分布と、含有率の影響を示したもので

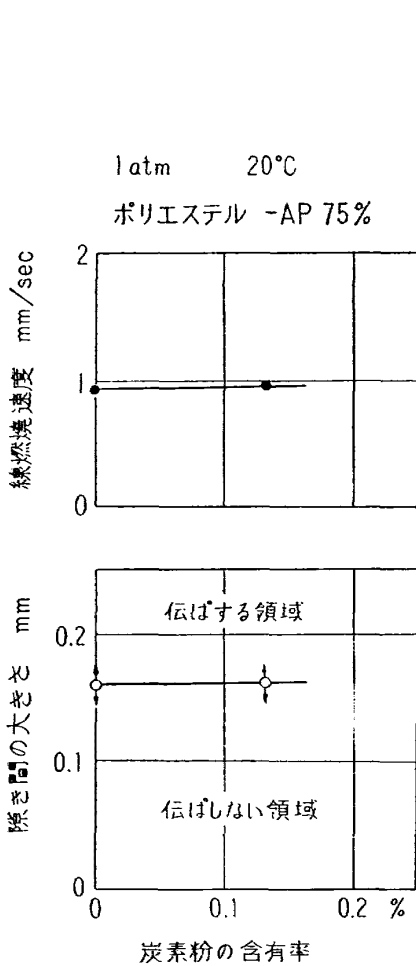


図 8 割れ目内火炎伝ばへの炭素粉添加の影響

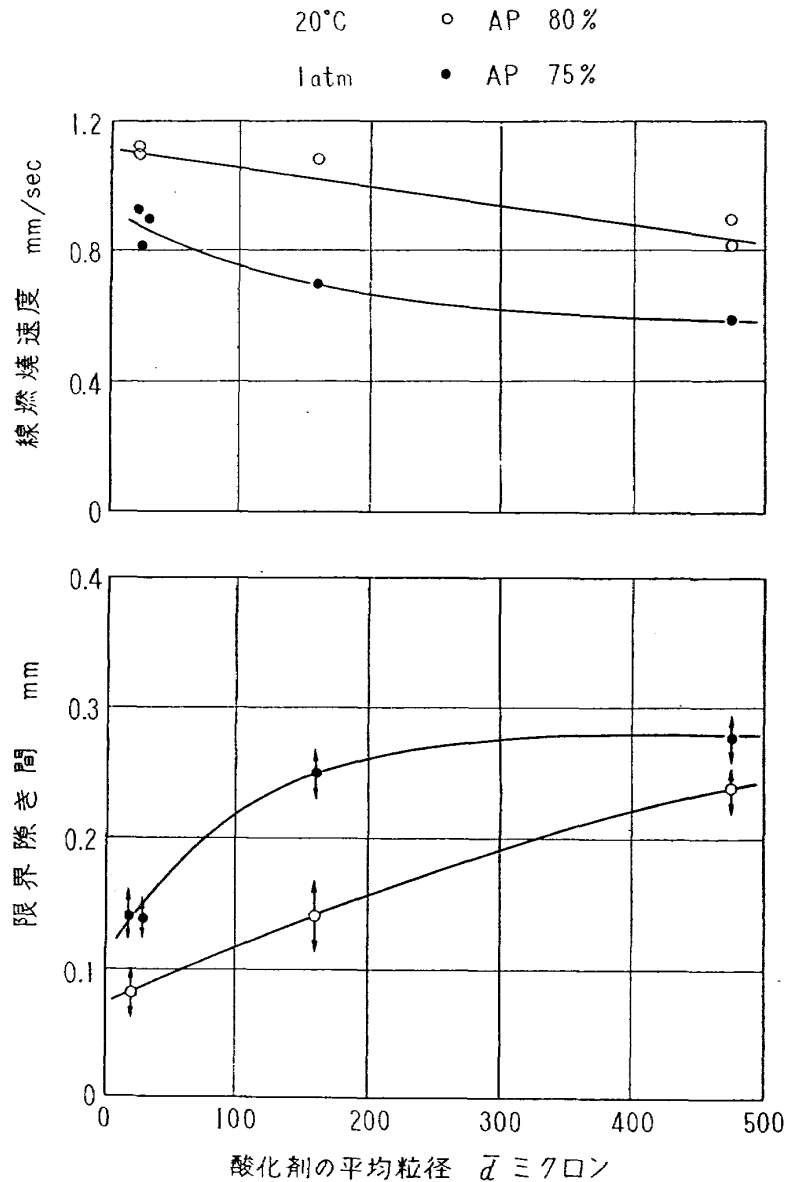


図 9 酸化剤の粒度分布と含有率の割れ目内火炎伝ばへの影響

ある。過塩素酸アンモニウムの含有率が 75 % のプロペラントのほうが、80 % 含有のプロペラントよりも限界隙き間が小さい。この傾向は、粒度分布と関係なく常になりたっている。粒度分布の影響は図 9 に示すように、平均粒子直径が 23 ミクロンの細かい場合に比べて、大きい粒子を含むプロペラントでは限界隙き間が増加する。しかし、ある程度より大きい粒子を含むプロペラントでは、この限界隙き間増加の傾向が弱まってくる。

4. 考 察

プロペラントの初期温度、環境圧力、組成の限界隙き間への影響を個々に調べたが、これを統一的に、線燃焼速度に対して、限界隙き間をプロットしたのが、図 10 である。初期温度が 25°C から -25°C の範囲、環境圧力は、0 から $3.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の範囲、酸化剤含有率は、75 および 80 % の 2 種類、酸化剤の平均粒度は、23 から 477μ の範囲内のすべての測定値は、多少のばらつきがあるが、基本的には、線燃焼速度の関数として表わせる。すなわち、線燃焼速度の大きい状態であるほど、限界隙き間が減少する傾向が見られる。しかしながら、たとえば酸化剤平均粒径 23μ で、

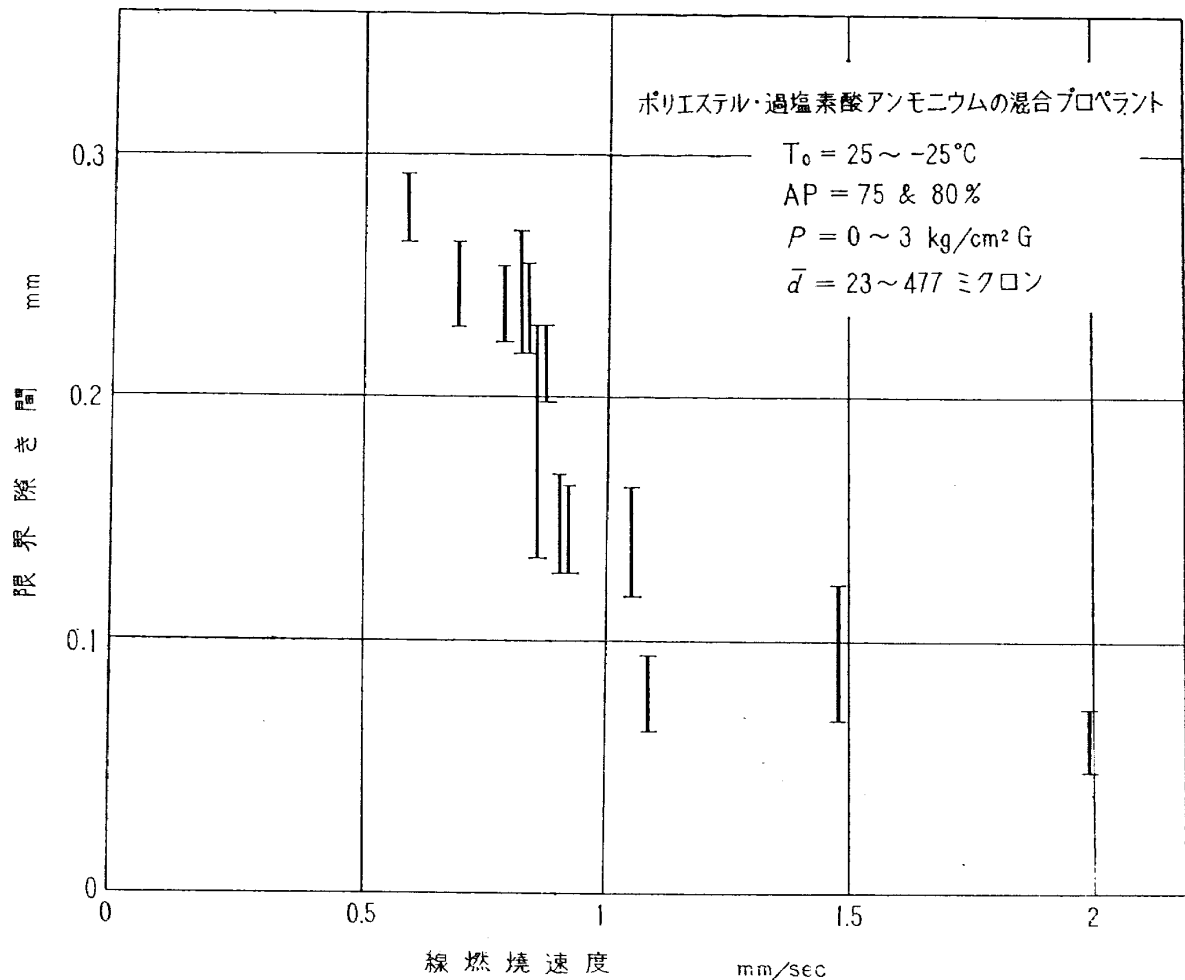


図 10 線燃焼速度の割れ目内火炎伝ばへの影響

酸化剤含有率 75% のプロペラントと酸化剤平均粒径 477μ で、酸化剤含有率 80% のプロペラントを比べると、両者とも線燃焼速度は同一であるが、限界隙き間は前者に比して、後者は約 2 倍である。したがって、第一義的に限界隙き間は、線燃焼速度の関数ではあるが、線燃焼速度のみで決まるものではない。

固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ばの現象を、定性的に調べてみると、気体の燃焼における quenching 現象と類似していることがわかる。この二つの現象を比較すると、quenching では、気体の流路まわりの壁が、不燃物で形成されているのに反して、本現象では可燃物の固体プロペラントにより、壁が形成されていることが主なる相違点である。固体プロペラントの燃焼は、主として、酸化剤蒸気および燃料蒸気の拡散による混合、さらに、それに続く化学反応によって制約されるが、線燃焼速度の早いプロペラントほど、これらの速度が早いと考えられる。

割れ目内へ、炎がはいったと仮定して、周囲の冷たい固体プロペラントの壁によって、炎が冷却される割合、すなわち炎生成の負の効果が、混合および化学反応という炎生成の正の効果より強ければ、割れ目内へはいった火炎は消滅する。したがって、現象的には割れ目内へ火炎が伝ばしない。この逆の場合、冷却速度よりも、混合、反応速度のほうが早ければ、炎は割れ目内で消滅しない。したがって、割れ目内へ火炎が伝ばすることになる。線燃焼速度の大きいプロペラントほど、炎生成の正の効果が大きいから、より狭い割れ目内へまで、火炎が伝ばする。基本的には、このような模型を考えることによって、本現象を説明できるものと思われる。

5. 結 語

固体プロペラントの割れ目内面への火炎伝ばについて、ポリエステル系コンジット・プロペラントの試験片を用いて、実験的に次のことが確かめられた。

1. ある隙き間以上の広い割れ目では、割れ目内面へ火炎が伝ばするが、その隙き間より狭い割れ目では、割れ目内面へ火炎が伝ばしないという「限界隙き間」が必ず存在する。(0.20 ~ 0.25 mm)
2. 限界隙き間は、プロペラントの初期温度、環境圧力、組成の関数であるが基本的には線燃焼速度の関数で表わせる。そして、線燃焼速度が大きいほど限界隙き間は減少する。

最後に、本研究に関して終始、ご協力いただいた模型研究室の田村技官に感謝する。

文 献

- 1) H.C. Barnett and R.R. Hibbard; Basic Considerations in the Combustion of Hydrocarbon Fuels with Air, NACA Report 1300 (1957) pp. 84~.
- 2) B. Lewis, R.N. Pease and H.S. Taylor; Combustion Processes (1956) pp. 216~310, Princeton.
- 3) R.B. Beyer and N. Fishman; Solid Propellant Ignition Studies with High Flux Radiant Energy as a Thermal Source, Solid Propellant Rocket Research (1960) Academic Press.
- 4) M. Gerstein and A.E. Potter; Considerations Related to the Quenching of Flames with Simple Kinetics, Preprint Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute (1958) pp. 69~79.
- 5) W.E. Price, H.H. Bradley, J.D. Hightower and R.O. Fleming; Ignition of Solid Propellants, AIAA Solid Propellant and Rocket Conference, Preprint 64~120 (1964).
- 6) C. Orr and J.M. Dallevale; Fine Particle Measurement, (1960) Macmillan Comp.

<p>NAL TR-91 航空宇宙技術研究所 固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)</p> <p>1965年7月 12ページ</p> <p>固体プロペラント, グレインの非破壊検査基準を調べるために, プロペラントの割れ目内への火炎伝ばの実験的研究を行なった。火炎伝ばの限界隙き間が常に存在し, これは主として, 線燃焼速度の関数であることを示した。</p>	<p>I. 五代富文 II. NAL TR-91 III. 621.455</p>	<p>NAL TR-91 航空宇宙技術研究所 固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)</p> <p>1965年7月 12ページ</p> <p>固体プロペラント, グレインの非破壊検査基準を調べるために, プロペラントの割れ目内への火炎伝ばの実験的研究を行なった。火炎伝ばの限界隙き間が常に存在し, これは主として, 線燃焼速度の関数であることを示した。</p>	<p>I. 五代富文 II. NAL TR-91 III. 621.455</p>
<p>NAL TR-91 航空宇宙技術研究所 固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)</p> <p>1965年7月 12ページ</p> <p>固体プロペラント, グレインの非破壊検査基準を調べるために, プロペラントの割れ目内への火炎伝ばの実験的研究を行なった。火炎伝ばの限界隙き間が常に存在し, これは主として, 線燃焼速度の関数であることを示した。</p>	<p>I. 五代富文 II. NAL TR-91 III. 621.455</p>	<p>NAL TR-91 航空宇宙技術研究所 固体プロペラントの割れ目内への火炎伝ば (I)</p> <p>1965年7月 12ページ</p> <p>固体プロペラント, グレインの非破壊検査基準を調べるために, プロペラントの割れ目内への火炎伝ばの実験的研究を行なった。火炎伝ばの限界隙き間が常に存在し, これは主として, 線燃焼速度の関数であることを示した。</p>	<p>I. 五代富文 II. NAL TR-91 III. 621.455</p>

- TR-84 遷音速タービン翼列二次元試験 (II)
Experimental Investigation on Transonic
Turbine Cascades (II) 1965年3月 近藤博, 蓑田光弘
山崎紀雄
- TR-85 回転翼の線型理論 (II)
—揚力線理論— 1965年3月 市川輝雄
Linearized Aerodynamic Theory of Rotor
Blades (II)
—Lifting-Line Theory—
- TR-86 高速多段軸流圧縮機の部分負荷特性の一計
算法 1965年5月 松木正勝, 藤井昭一
五味光男
A Method for Predicting the off-design
Performance of Multi-Stage Axial-Flow
Compressors Operating in the Transonic
Flow
- TR-87 亜音速流中のパネルフラッタとダイバージェ
ンス (II) 圧縮流理論 (III) 実験的研究 1965年6月 石井孝雄
Study of Two Dimensional Panel Flutter and
Panel Divergence in Subsonic Flow (II)
Compressible Flow Case (III) Experimental
Study
- TR-88 尾翼, 胴体結合構造物の地上振動試験結果に
関する定性的な吟味 1965年6月 埴武敏, 越出慎一
Qualitative Examinations on the Results of
Ground Vibration Tests of Tail Wing-
Fuselage Combination Structure
- TR-89 垂直突風および航空機の突風応答に関する実
験的研究 1965年6月 小野幸一, 山根皓三郎
An Experimental Investigation on Vertical
Gusts and the Airplane Response
- TR-90 ヒステリシスループの形, 繰返しによる形の
変化および繰返し後の塑性流動応力の上昇
(第一報 実験, 第二報 ねじりの場合の理
論) 1965年7月 中西不二夫, 佐藤和郎
永井文雄
The Shape of Mechanical Hysteresis Loop,
its deformation due to Stress Repetition
and Resulting Increase in Flow Stress
(Part 1. Experiment, Part 2. Theory for
Torsion)

航空宇宙技術研究所報告91号

昭和40年7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1,880
電話武蔵野(0422)(4)9171(代表)

印刷所 笠井出版印刷社
東京都港区西新橋1の21の8
