

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-394

小口径パイプ内の燃焼波伝播

野溝国生・田村 洋・奥嶋澄男

1974年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

小口径パイプ内の燃焼波伝播*

野溝国生** 田村 洋*** 奥嶋澄男****

Propagation of the Flame within a Narrow Tube

By Kunio NOMIZO and Hiroshi TAMURA and Sumio OKUSOWA

When one observes the propagation of flames in tubes, it becomes apparent that under certain conditions the propagation velocity varies with the time from the start. In the investigation of such flames, Berthlot and Vieille, as well as Mallard and Le Chatelier, established that the flame front attains a high velocity which then remains constant, such phenomena being known as detonation.

In order to study the characteristics of detonation and of normal flame within a narrow tube, this experiment concerning flame quenching within a narrow tube, and analysis of the heat loss of the flame were performed.

1 ま え が き

パイプ内の可燃ガス中に於ける炎の伝播は、炎の進行方向に時間と共に速度を増してゆくが、化学反応領域の燃焼ガスの発生する熱エネルギーと、化学反応領域前面に於けるガスの内部エネルギー、運動エネルギーまたふく射及び熱伝導などによる熱損失などが平衡状態に達した時、炎の伝播速度は一定となり、この状態がDetonationと呼ばれており、その発生はパイプ内ガス圧力、パイプ径、燃焼ガスの内部エネルギーによって左右される。

図1にその状態を示す。

Detonationに関しては、可燃ガスに点火されてからDetonation波になるまでの距離(立上り距離又はInduction Distance)およびパイプ壁に対する熱損失など、すでに実験を含めて幾つかの研究が報告されているが、¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾いずれも定量的な結論を得るほど十分なものではない。特に小口径パイプ内に於けるDetonation波の伝播については、パイプ壁による熱損失の割合が大きく、従来の理論計算に於て

は、十分にDetonation波の特性を表わすことが出来ない。さらにくわしくDetonation波を解明するためには、従来の理論の拡張と、さらにそれを裏付けるための実験によって、定量的な値を把握する必要がある。すなわち管壁に対する損失を考えた場合、大口径のものについては境界層の影響によるパイプの単位長さ当りの壁面の影響は小さいのに対して、小口径のものについてはその影響は大きいものと考えられる。この事がパイプ内のガスのエネルギー損失の大小に影響を与える。この事をまず実験的に調べるために、小孔の入口面積、小孔の長さ、入口を通過する燃焼波の速度などをパラメータとして、通常燃焼波およびDetonation波について実験を行う必要がある。

本実験では可燃ガスとして、プロパン、および酸素の理論混合比に対する混合比の割合(Equivalence Ratio)を0.5~1.5とし、パイプ径 $\frac{1}{4}$ ~1 inch、ガス圧力を0.2~1気圧の条件のもとで、Detonation波の立上り距離(Induction Distance)および、小孔内への燃焼波の伝播の測定を行った。

成果の応用面は一般の燃焼実験ほどの一般性はないが、Quenchingの問題は小さなわれめ、細口に対する燃焼波伝播として固形物の燃焼等に応用出来るものである。

* 昭和49年3月25日受付

** 宇宙研究グループ

*** 元宇宙研究グループ、現角田友所

**** 元宇宙研究グループ

記 号		
A_G	m^2	ガスの表面積
B		定数(経験的比例定数)
C_P	$cal/g \cdot ^\circ K$	ガスの比熱
D	m/sec	Detonation 波面の速さ
ΔD		D の減少分
d	m	管の内径(Detonation 波用)
d_I	m	Induction distance
E_G	$Kcal/m^2 h$	黒体の全ふく射
E	cal/mol	活性化エネルギー
F_O		定数
F	C, H_2 のモル分率	
Ha	cal/g	混合ガスの単位質量当り放出される熱量
h	$cal/sec \ m^2 \ deg$	熱伝達係数
K'	$(Kg/cm^2)^{0.2}$	
K_{in}		比例定数
k	$Kcal/m \ h \ ^\circ C$	平均熱伝導率
k'		比熱比
l	mm	小孔長さ
M	$Kg/m^2 h$	単位時間, 単位断面積当りの質量流量 (h : 時間)
M'	Kg/cm^2	管内ガス圧力
O		O_2 のモル分率
P	Kg/cm^2	小孔に対する炎の通過, 不通過領域境界に於ける管内ガス圧力
Q	erg/gr	単位質量当りの発熱量
Q_G	$Kcal/h$	ガスから発するふく射熱量
Q	$cal/sec \cdot cm^2$	問題としている平面の間に含まれる炎の管の単位断面積当りに於て放出される熱量
R	$erg/mol \ deg$	ガス定数
r	cm	管の半径
S_u	m/sec	炎の速さ
T_G	$^\circ K$	ガス塊の温度
T_W	$^\circ K$	管壁の温度
T_u	$^\circ K$	未燃ガスの温度
T_f	$^\circ K$	燃焼中のガスの温度
T_{in}	$^\circ K$	小孔の入口に於ける小孔の中心附近の温度
t_b	$^\circ K$	平均流体温度
x_1	cm	化学反応領域の長さ
α	$Kcal/m^2 \ h \ ^\circ C$	平均熱伝達率
$\bar{\alpha}$	$sec \ cm$	平均熱拡散係数
δ	cm	炎の厚さ
ϵ		小孔内部にゆくにしたがって0に近づく変数
ϵ_G		ガスのふく射率
ρ_u	g/cm^3	未燃ガスの密度
Φ		Equivalence Ratio
ϕ	m^2	パイプ断面積

添 字

a	断熱
G	ガス
S	燃焼ガス C, H_2 および O_2 の理論混合比

2 基 礎 式

2.1 Detonation

図1はDetonation 波面の伝播を単純化したモデルにおきかえてみたものである。パイプ壁に対する熱損失, 摩擦損失, ふく射伝熱損失を全く考えない場合にはDetonation 波面の速度は次式で表わされる。⁽³⁾

$$D = \sqrt{2(k'^2 - 1)Q} \quad (2.1)$$

(2.1)式はパイプ径が非常に大きい場合には十分よい近似となる。

次にパイプ壁に対するエネルギー損失については, その原因としては次の3つの要素が考えられる。

1. パイプ壁に対する摩擦損失
2. パイプ壁に対する熱伝達損失
3. パイプ壁に対するふく射伝熱損失

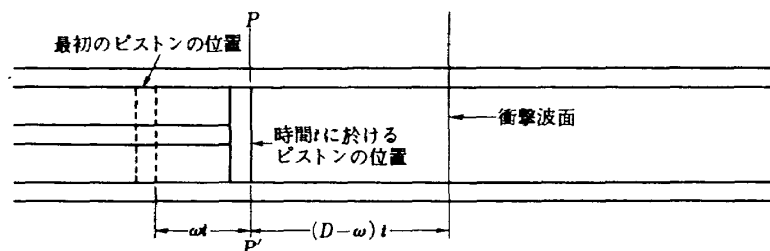


図 1 Detonation 波伝播の説明図

摩擦によって失われるエネルギーは熱エネルギーとなるので摩擦損失は、熱伝達損失となると考えられる。したがってこの場合にはパイプ内の乱流熱伝達としてこの問題を扱うことにする。

α を平均熱伝達率とすると、本実験に於て使用するガスとパイプ壁の α は、

$$\alpha \propto M^{0.8} / d^{0.2} \text{ (Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C)} \quad (2,2)$$

よって単位質量当りの損失は、

$$\alpha \propto M^{-0.2} / d^{0.2} \text{ (Kcal/Kg}^\circ\text{C)}$$

$$\alpha \propto M^{-0.2} \text{ (Kcal/Kg}^\circ\text{C)} \quad (2,3)$$

となる。実験によるDetonation波の速度の測定値は当然熱損失の影響を受けている。なぜならばDetonation波面とパイプとの摩擦により発達した境界層の影響を受けるからである。

熱伝達によるDetonation波の速度の減少は、(2,1)式に於てDetonation波の速度の減少をQの減少として考えるものとすれば、エネルギー損失は $M^{-0.2}$ に比例するから

$$D = \sqrt{2(k'^2 - 1)Q(1 - KM^{-0.2})}$$

$$K: \text{比例定数} \quad (2,4)$$

と表現され得る。((2,3) 参照) M' をパイプ内気圧とすれば、

$$D = \sqrt{2(k'^2 - 1)Q(1 - K' M'^{-0.2})}$$

$$K': \text{比例定数} \quad (2,5)$$

ふく射伝熱による損失については、燃焼ガスが特に高い温度の場合に、その影響が生じるものと思われるが通常省略してもかまわない。

この検討は附録に於て行う。

2.2 小孔内の燃焼波伝播

小口径の場合についても、前節で述べた3種の損失は存在するが、熱伝達による損失が特に大きいと考えられる。つまり大口径のものについては、境界層の影

響によるパイプの単位長さ当りの壁面の影響が小さいのに対し、小口径のものについては大きいものと考えられるので、小口径の場合について解析してみることにする。この場合は境界層の影響が大きいため管内の発達した流れを仮定し一次的解析をする。

一次元の燃焼波伝播に於て、燃焼波は、加熱領域、化学反応領域、化学反応後の領域の3つの領域に分けられる。

図2に於て

$x = l$ から $x = \infty$ が加熱領域 (Heating Zone)

$x = 0$ から $x = l$ が化学反応領域 (Reaction Zone)

$x = -\infty$ から $x = 0$ が化学反応後の領域 (Post Reaction Zone)

加熱領域と化学反応領域の境界面、つまり燃焼波面は x 軸の正方向に向って $Su \text{ cm/sec}$ (波面に毎秒、単位断面積当りに入る質量の割合) で伝わるとすると、質量流量の割合が

$$m = \rho u Su \text{ (g/cm}^2\text{sec)} \quad (2,6)$$

となる。

炎の内部についてはSemenov⁽⁸⁾によって示されたように、反応の大部分が炎の最高温度 T_f の近くでおこる。

Semenovによれば、

$$\text{熱の発生割合} \propto \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) \quad (2,7)$$

断熱の炎に対しては、未燃ガス(温度 T_u)と、燃焼中のガス(温度 T_f^a)のエネルギーのバランスの式は次のようになる。

$$\rho u Su^a (C_p T_u + H^a) - \rho u Su^a C_p T_f^a = 0 \quad (2,8)$$

比熱を一定とし、熱損失を考えにいれると、未燃ガスと炎の中の最高温度 T_f との間のエネルギーのバランスは、

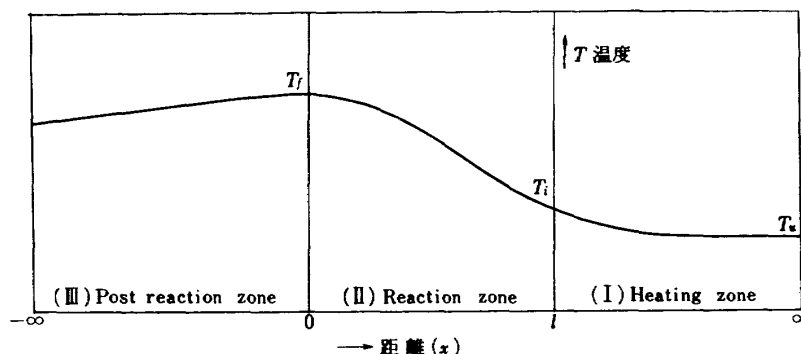


図 2 距離 x の函数としての炎の温度分布 (Spalding と von Karman による)

$$\rho_u S_u (C_p T_u + H^a) - \rho_u S_u C_p T_f - q = 0 \quad (2.9)$$

$\rho_u S_u$ は熱損失を伴った質量流量であり、 q cal/cm²·sec は、熱伝導、摩擦損失、放射伝熱等すべてを含めた、熱損失である。(2.8)式から $T_f^a = T_u + H^a / C_p$ であり、したがって、(2.9)式は次のようになる。

$$q = \rho_u C_p S_u (T_f^a - T_f) \quad (2.10)$$

燃焼速度 S_u は主として炎の最高温度の関数である。パラメータ B 及び E を含む近似式として(2.11)式を導入する。⁽⁸⁾

$$S_u = B \exp\left(-\frac{E}{2RT_f}\right) \quad (2.11)$$

(2.11)式を(2.10)式に代入すると、

$$q = \rho_u C_p (T_f^a - T_f) B \exp\left(-\frac{E}{2RT_f}\right) \quad (2.12)$$

この等式は炎からの熱損失の割合を与えるものであり、 T_f^a 、 T_f および E の関数であることを示す。又これは炎の最高温度の関数として、定常状態のエネルギーのバランスを与える。炎の最高温度の変化と共に熱損失の割合の変る状況は、図3に示されるとおりである。これからわかるとおり、熱損失はある最高値をこえることはない。

次にパイプ壁の温度 T_w が未燃ガスの温度 T_u に等しいと仮定すると、熱伝達の立場から q は、パイプ径 d 熱伝達係数 h 及び T_f の関数として、

$$q = h(T_f - T_u) \pi d \delta / \frac{1}{4} \pi d^2 (= q_{conv}) \quad (2.13)$$

でなくてはならない。

薄い炎については、化学反応領域の厚さ δ は燃焼速度と炎に於ける平均熱拡散係数の関数として

$$\delta = \frac{\bar{\alpha}}{S_u} \quad (2.14)$$

として与えられる。一般に熱伝達係数は⁽⁸⁾

$$h = F_o^2 \bar{k} / d \quad (\bar{k} \text{ は } k \text{ の平均値}) \quad (2.15)$$

F_o は炎の形状による因数である。(ほとんど1に

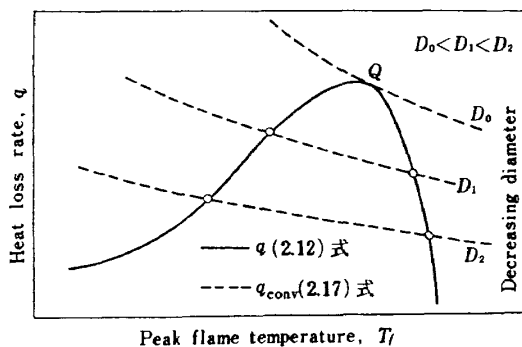


図 3 炎の最高温度の関数としての熱損失の割合

近い定数である)(2.13)(2.14)(2.15)を結びつけると

$$q = 4F_o^2 (\bar{k} d / d^2 \cdot S_u) (T_f - T_u) = (q_{conv}) \quad (2.16)$$

となり(2.11)を考慮すると、

$$q = 4F_o^2 (\bar{k} d / d^2 B) \left(\exp\left(-\frac{E}{2RT_f}\right) \right) (T_f - T_u) \quad (2.17)$$

となる。つまり q は(2.12)(2.17)、両式を同時に満足するものでなくてはならない。つまり、

$$\begin{aligned} \rho_u C_p (T_f^a - T_f) B \exp\left(-\frac{E}{2RT_f}\right) \\ = 4F_o^2 (\bar{k} d / d^2 B) \exp\left(-\frac{E}{2RT_f}\right) (T_f - T_u) \end{aligned} \quad (2.18)$$

となる。又(2.18)の解はグラフ的に図3に与えられている。グラフからも明らかなように、大きな管に対しては2つの解が可能である。一つはおそい炎に相当し、他方は速い炎に相当する。おそい炎は物理的に不安定である。径が小さくなるにつれて、解はひとつの解に近づく、 Q 点で、これが炎のきえる点である。すなわち管の径が D_0 以上ならば火は小孔を通過する。グラフの説明からも明らかなように、クエンチングする点(炎の消える点)の管の径は点 Q に於て次の関係を満足していなければならない。

$$\frac{dq_{conv}}{dT_f} = \frac{dq}{dT_f} \quad (2.19)$$

3 実験装置及び実験方法

3.1 波面伝播速度の測定

燃焼波面が未燃ガスに比して非常に導電率が大きい($10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)ことを利用し、燃焼波面の通る中に2本の針金を出し、針金に電圧をかけた場合に、燃焼波面通過と同時に針金に電流が流れることを利用し、パイプ内の2点間を燃焼波が通過する時間を測定することによって燃焼波面の伝播速度を測定する。

装置の概略を図4に示す。なおイオンプローブはパイプにそって幾本もとつけられている(図4には2本)。

次に図4の構成及び機能について説明する。

1は誘導コイルで2のパイプ内のガスに点火する装置である。2のパイプには7の混合器より、11のバルブを通して混合ガスが流入する。3は時間測定用の2つのイオンプローブの間を燃焼波面が通過する時間を計測するカウンターである。4はセロハン隔膜を破って外に出た燃焼ガスの音をやらわげる消音器である。5はパイプに混合ガスを入れるに当りパイプ内のガスをぬくポンプである。

3.2 Induction distance の測定

パイプ内の炎の伝播速度は、点火後しばらくは遅く次に速くなり、その後一定の速度となる。であるからイグナイタから、パイプ内の可燃ガスに点火した後、

突如炎の速さの速くなる点までの距離を計測し、Induction Distance とする。

実験条件はパイプ内径が $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1 inch であり、又パイプ内のガス圧力は 0 から 1 気圧である (絶対圧)

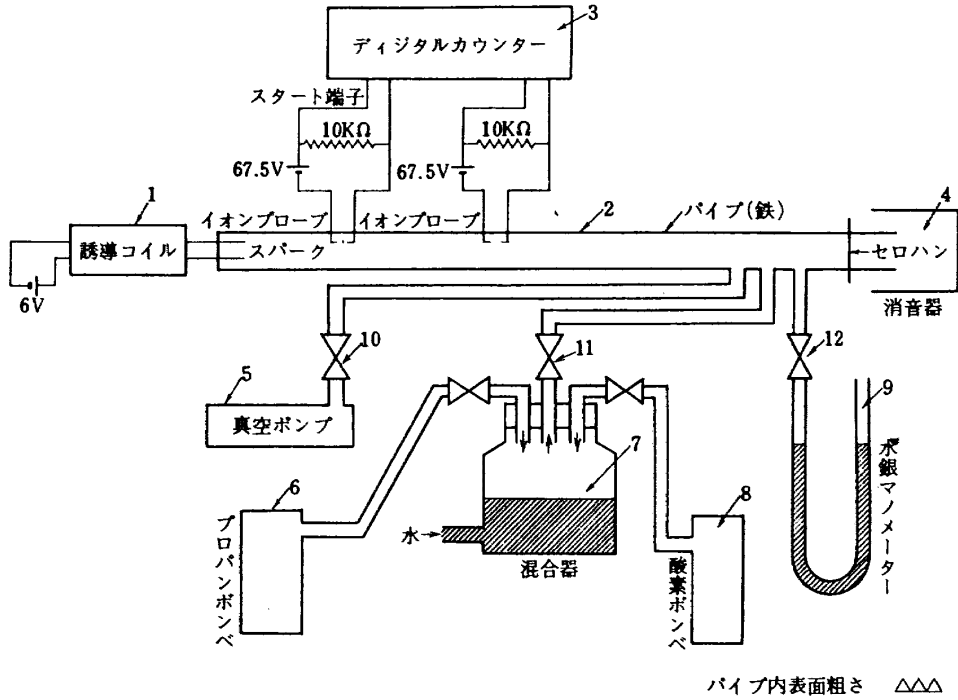


図 4 Induction Distance 測定装置

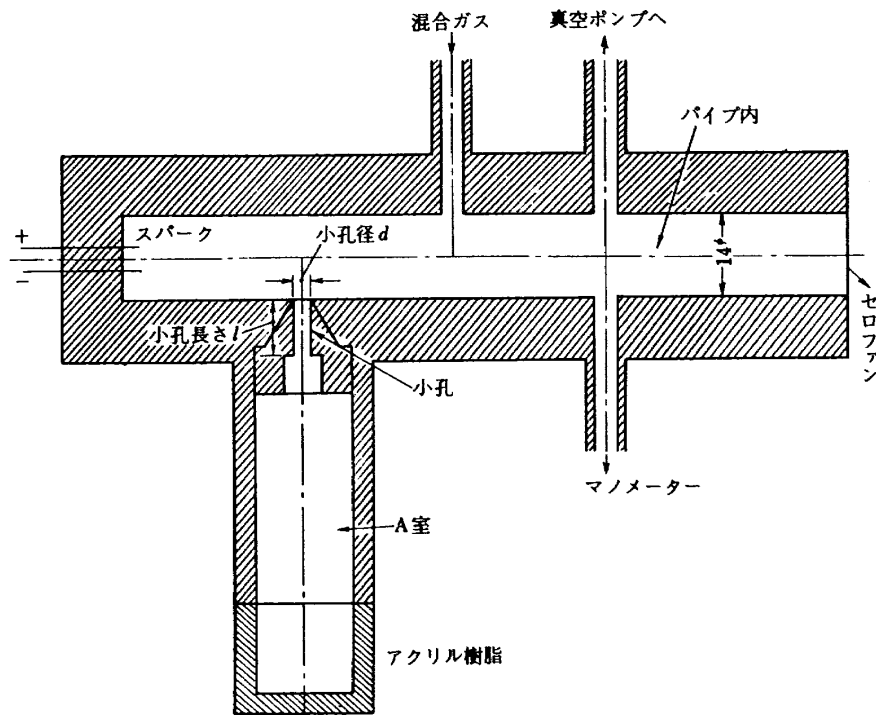


図 5 通常燃焼波用短パイプ

なお $\frac{1}{4}$ inch は 0.64cm , $\frac{1}{2}$ inch は, 1.27cm , 1 inch は 2.54cm である。

着火の方法は誘導コイルで行い、火花の強さは、長さ 1mm の針金を間隔 1mm で平行に置いた時、放電する強さであり、その図は図4に示されている如くである。管端から着火源までの距離はほとんど0であり、着火寸前の温度は室温 20°C である。

3.3 小孔に対する炎の伝播

実験装置の概略は、図5、図6の如くである。図5は通常燃焼波の場合、図6は Detonation 波の場合を示す。図からも明らかな如く、小孔は通常燃焼波の場合、イグナイタのすぐそばに Detonation 波の場合には小孔を、イグナイタ、および Detonation 波の立上りの位置から十分にはなれた下流側におくものとする。

実験条件はパイプ内径を通常燃焼波、Detonation 波共、内径 14mm としパイプ内ガス圧力を0気圧から1気圧まで変化させた。小孔の径は、 0.3mm と 0.5mm とし、小孔の長さは、 0.3mm , 0.7mm , 2mm , 5mm , 10mm , 20mm , 30mm である。

実験方法としては、パイプ内、小孔内、A室を、所定の混合比および圧力の混合ガスで満たして、スパークで点火する。その結果生ずる燃焼波が、小孔前を通過する時、A室内に燃焼波が伝わるか否かを確認しなければならない。A室内のガスに点火され、透明なアクリル樹脂を通してA室が光るのを観測した時、炎は小孔を通過したものとする。これを種々の小孔長さ l 、及び小孔径 d について行う。測定は肉眼で行った。

4 測定結果

パイプ内のガス圧力を 0.7 気圧から 1 気圧まで変化させた場合の Detonation 波面の速度を測定した結果を図7に示す。なおガスはプロパン対酸素の体積混合比を $1:3$ から $1:8$ まで変化させた。

図7は安定状態に於ける Detonation 波の速度対パイプ内ガス圧力曲線であり、パイプ径は $\frac{1}{2}$ inch である。たて軸に Detonation 波面の速度、横軸に

パイプ内ガス圧力をとってあるが、パイプ内ガス圧力が減少するにしたがって、Detonation 波面の速度が減少するのがわかる。

次にパイプ内ガス圧力を 0.1 気圧から 1 気圧まで変化させた場合の Induction Distance を測定した結果を示す。なおガスはプロパン対酸素混合比を $1:4$ から $1:7$ まで変化させた。この場合はパイプ径 $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1 inch のものについて実験を行った。

図8から図10は全て Induction Distance 対管内ガス圧力曲線である。グラフからも明らかな如く、パイプ径の大きなものは、Induction Distance が大きく、パイプ径の小さなものは小さい。又管内ガス圧力対 Induction Distance の関係はほぼ反比例の関係にある。なお quenchind に関する実験の場合には、Detonation 波用のパイプは以上のグラフをもとにし、パイプの $\frac{L}{D}$ を 70 以上にとって実験した。図11から図14までは小孔に対する燃焼波 (Detonation 波を含む) の通過領域、不通過領域の境界を表わしたものである。横軸が Equivalence Ratio である。又図15～図18も燃焼波の通過領域、不通過領域をプロットしたものであるが、小孔長さを横軸にとってある。なお理論混合比はプロパン 1 に対し酸素 5 である。

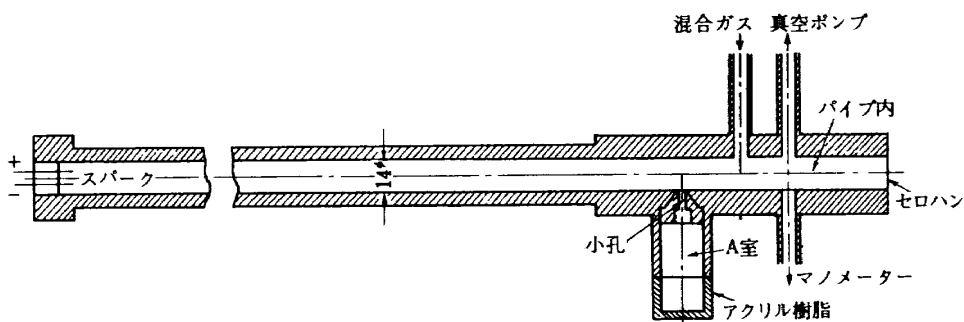


図 6 Detonation 波用長パイプ

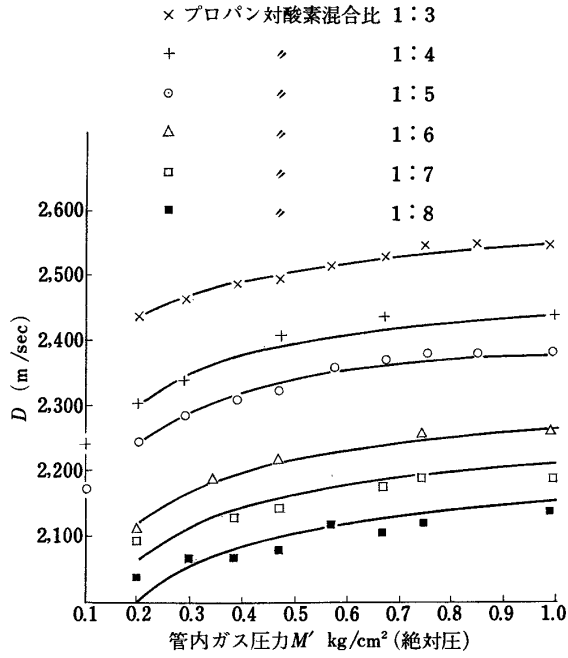


図 7 安定状態に於ける Detonation 波の速度対管内ガス圧力曲線 管径: 1 inch

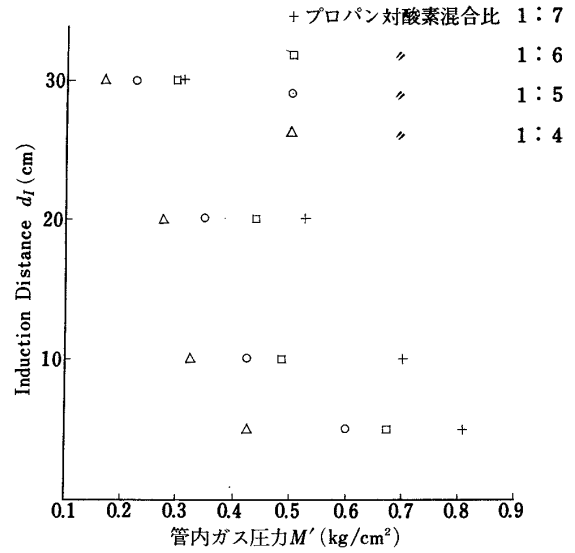


図 9 Induction Distance 対管内ガス圧力曲線 管径: 1/2 inch

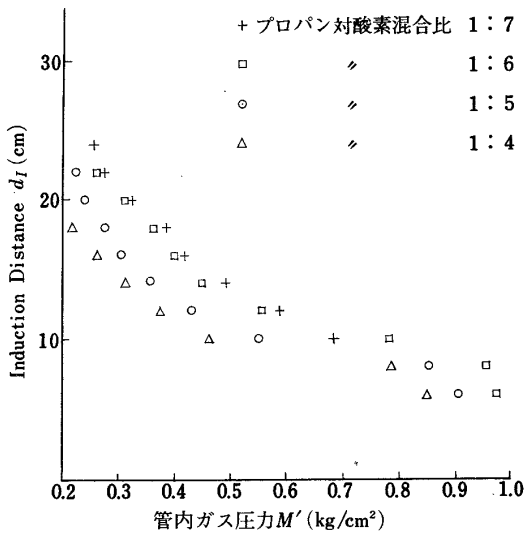


図 8 Induction Distance 対管内ガス圧力曲線 管径: 1/4 inch

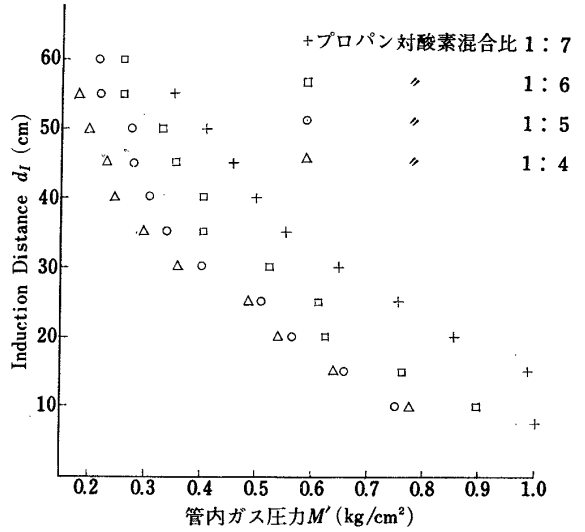


図 10 Induction Distance 対管内ガス圧力曲線 管径: 1 inch

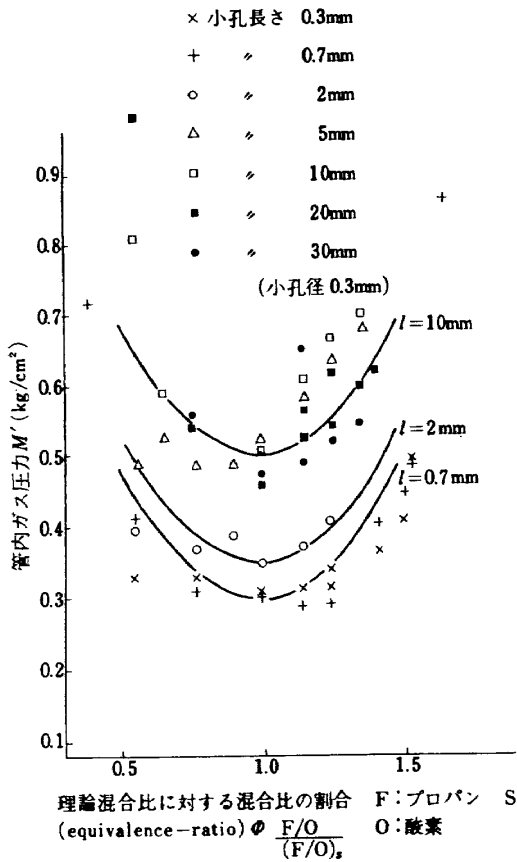


図 11 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点 通常燃焼波の場合

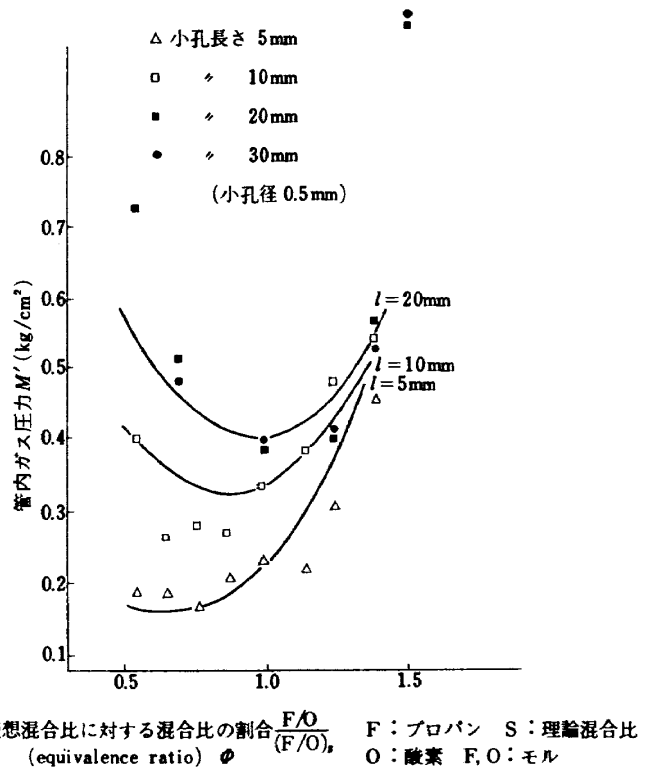


図 13 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点 通常燃焼波の場合 (短パイプ使用)

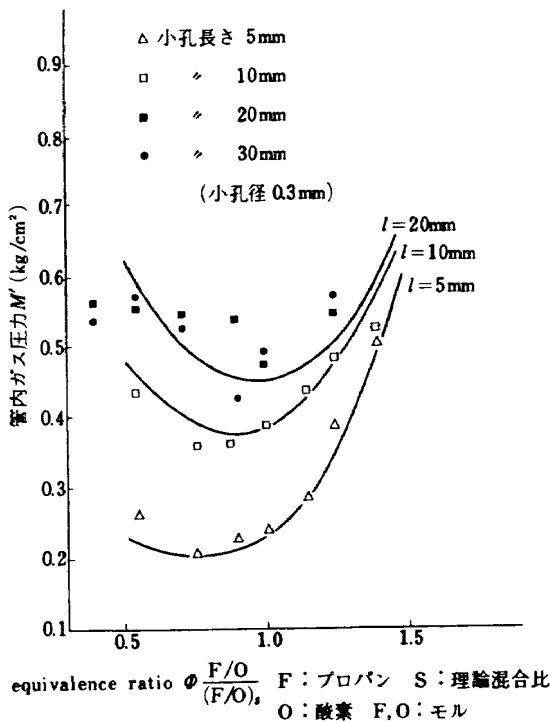


図 12 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点 Detonation波の場合

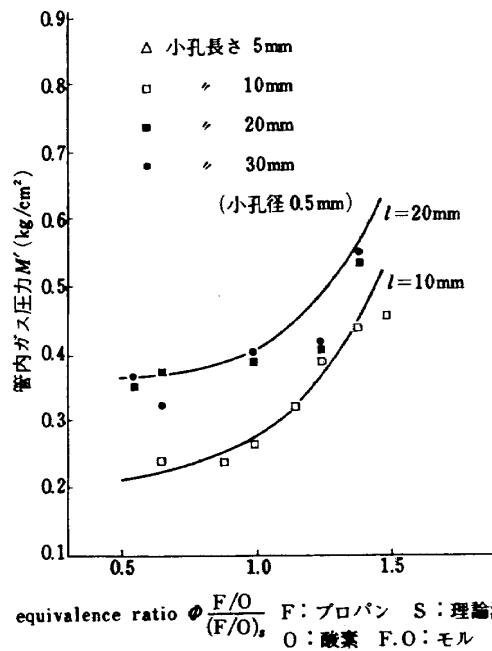


図 14 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点 Detonation波の場合

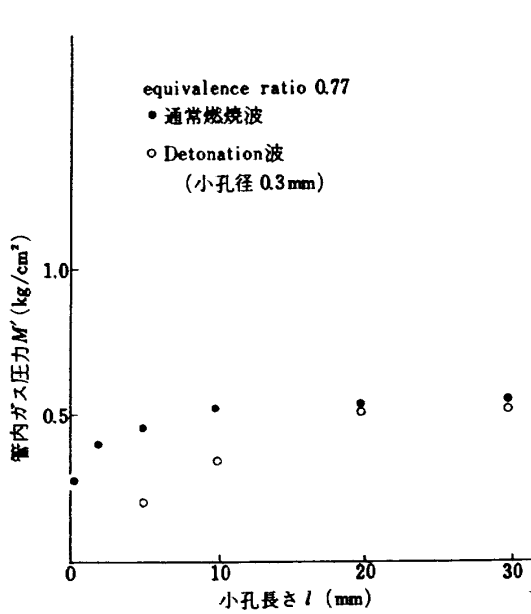


図 15 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点, Detonation波の場合と通常燃焼波の場合の比較図 equivalence ratio 0.77

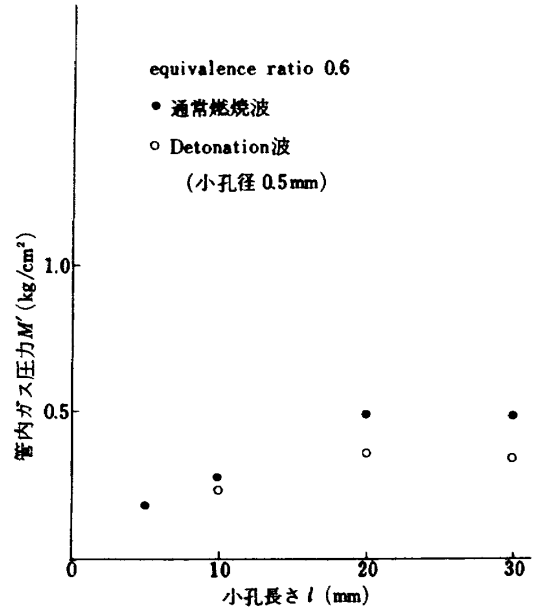


図 17 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点, Detonation波と通常燃焼波の場合の比較図 equivalence ratio 0.6

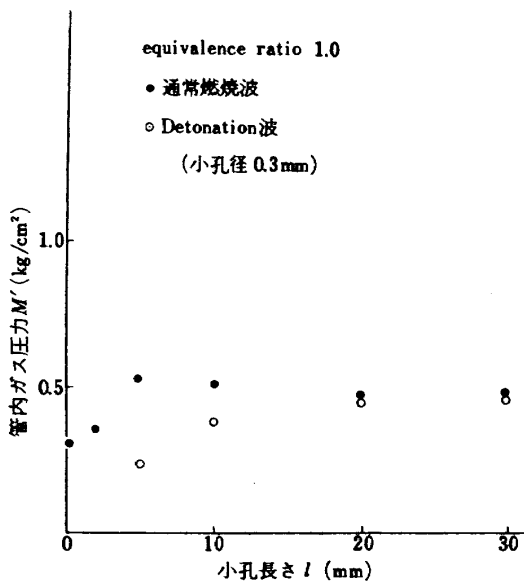


図 16 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点, Detonation波の場合 (長パイプ使用) と通常燃焼波の場合 (短パイプ使用) の比較図 equivalence ratio 1.0

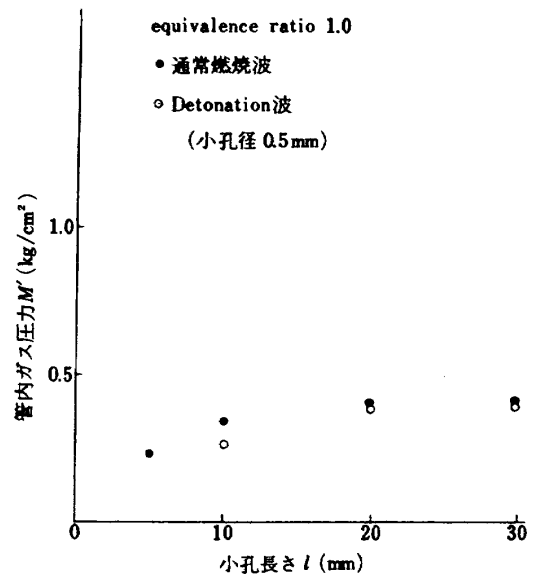


図 18 小孔に対する燃焼波の通過領域, 不通過領域の境界点, Detonation波の場合と通常燃焼波の場合との比較 equivalence ratio 1.0

5 検 討

5.1 パイプ壁がDetonation波に及ぼす影響

Detonation 波の速度は(2.5)より

$$D = \sqrt{2(k'^2 - 1)Q(1 - K' M'^{-0.2})}$$

K' : 定数 M' : ガス気圧

と表わされ、 k 、 Q および M' はそれぞれ、燃焼ガスの比熱比、発熱量、および気圧であり、ガスの成分および実験条件によって与えられる定数である。したがって(2.5)式は定数 K' を求めることにより定まり、またその特性を明らかにすることが出来る。実験値から K' の値を以下の如く求める。図7に於てプロパン、酸素の混合比が1:3の場合について、1気圧(パイプ内のガス圧力)の場合 Detonation 波の速度は2550 m/secであり、0.2気圧(パイプ内ガス圧力)の場合2440 m/secである。よって、速度の差 $\Delta D_{1-0.2}$ は

$$-\Delta D_{1-0.2} = 2550 - 2440 \text{ (m/sec)} \quad (5.1)$$

である。

$$D = 2500 \text{ m/sec} \quad (5.2)$$

とすると

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{2} K' M'_{0.2}^{-0.2} - \frac{1}{2} K' M'_{1}^{-0.2} = 0.036 \quad (5.3)$$

よって

$$K' = \frac{2}{10} (Kg/cm^2)^{0.2} \quad (5.4)$$

となる。図7のグラフは、たて軸にDをとり、横軸に M' をとったものである。(5.4)式の K' はプロパン、(C_3H_8)、酸素(O_2)混合比1:3の場合について計算したものであるが、他のグラフの K' もほとんど同じ値になる。以上、パイプ壁のDetonation波の速度に対する影響を M' をパラメータとして調べたものであるが、従来の理論においては M' をパラメータとして調べたものは少く、主としてパイプ径の影響について調べたものがほとんどである。⁽⁴⁾⁽⁵⁾

5.2 小孔を通過する燃焼波について

(a) 混合比の影響について

図11から図14は小孔に対する燃焼波の通過領域、不通過領域の境界線を示す。プロットより上側(高いガス圧力)では燃焼波は小孔を通過し、下側(低いガス圧力)では小孔を通過しない。グラフがこのような形を呈する要因としては、以下の3つが考えられる。

(1) 小孔入口に集中するエネルギー

未燃ガスが燃焼した結果、熱エネルギーが発生し、それが燃焼ガスの分子の熱エネルギーとなり、単位モル

当りのエネルギーが大きければ、大きい程、分子の熱エネルギーは大きいことになる。したがって小孔を燃焼波が通りやすくなる。

逆に単位モル当りのエネルギーが、小さければ、小さい程、分子の熱エネルギーは小さいことになり、したがって燃焼波は小孔を通りにくくなる。

(2) 燃焼波の小孔前に於ける滞在期間

これは小孔前の高熱ガス波面の滞在期間が長ければ長い程、小孔内に対して高熱ガスの影響が入りやすい。

(3) 小孔の大きさ

小孔の径の大きさが大きくなればなる程、単位モル当りの分子をとりまく管壁の面積が小さくなり、したがって単位モル当りの分子のとりまく壁から吸収される熱量が小さくなり、燃焼波は、小孔を通りやすくなる。そしてこれらの影響が互いに重ねられるものと考えられる。

図12、図13、図14のデータにより、理論混合比より O_2 rich側で通りやすくなる事は、 O_2 rich側の方がDetonation波の速度が小さく、小孔入口のところに化学反応領域が長時間滞在するため、より高密度の燃焼ガス、及び未燃ガスが入口内部に入り込むためであると考えられる。そしてこの事は通常燃焼波の場合についても言い得るものと思われる。又通常燃焼波よりもDetonation波の方がこの傾向が著しい。又小孔径が大きくなる程この傾向が著るしい。なおグラフが図11から図14までの形を呈する理由は、理論混合比近辺に於て単位モル当りの未燃ガスが燃焼することによって発生するエネルギーが最大となり、理論混合比よりずれると減少するからである。よって理論混合比近辺に於て最も燃焼波は小孔を通りやすい。

(b) 小孔長さの影響について

(1) 定性的な検討

通常のQuenchingに関する理論は、定常状態に達した後の理論であるが、この定常状態に達する迄に過渡的な状態が残っていることが、実験からも容易に推察される。図15~図18を参照すればわかるとおり、小孔長さの長い領域では、通過、不通過領域の境界管内ガス圧力はほぼ一定となるが、小孔長さの短い領域では長い領域に比して低い境界管内ガス圧力を示す。炎のきえる限界は温度の函数であるから、小孔の入口附近から小孔内部まで一定の温度の所に燃焼波の通過、不通過の境界がある。

又入口の高温ガスの影響が内部にゆくにたがって減衰する変数を ϵ と仮定すると、温度は小孔にそつて

$T \propto \epsilon + a_0$ ($a_0: \text{const}$) の形で減衰し、 l が大となるにしたがって a_0 の値に近づく。したがって小孔入口では温度はたかく、より小孔内部に比して低圧のガスでも燃焼波が通る。一方小孔内部に於ては燃焼ガスの温度は入口附近より低くなり、燃焼波面が通過するためには、未燃ガスの圧力を高くして、温度 T を燃焼波通過可能温度まで高めなければならない。

(ロ) 実験式の作成

次に炎の通過及び、不通領域の境界に於けるガス圧力を定める実験式を作成することにする。

小孔の入口の過渡的状態の影響が消失した状態では大体、 $\bar{\phi}$ を Equivalence ratio とすると、

$$P \propto (\bar{\phi} - 1)^2 \quad (5.5)$$

であることが、従来の文献から明らかであり、⁶⁾⁷⁾⁸⁾ その理論的な解析もすでに行われているので、ここではあらためて紹介しない。

又 P は燃焼波の小孔パイプ入口前に於ける滞在期間の影響を受ける。今その影響の程度を図7の結果を参考にして、

$$a_3 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.6)$$

とおく。 $\bar{\phi} - 1$ は理論混合比からのずれを与える。

以上の影響を加え合せたものが P であるとする、

$$P = a_1 (\bar{\phi} - 1)^2 + a_2 + a_3 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.7)$$

となる。 a_2 は l が大きくなるにしたがって大きくなりやがて一定となる定数である。

図11の場合について(通常燃焼波, 小口径0.3mm)(5.7)式に於て a_3 は省略することが出来ることが図11からも明らかである。つまり小孔パイプ前に於ける燃焼波の滞在期間の影響が無視出来ることを示す。

$l = 0.7 \text{ mm}$ の時 ($0.3 \text{ mm} \sim 0.7 \text{ mm}$ も含む)

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.3 \quad (5.8)$$

$l = 2 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.35 \quad (5.9)$$

$l = 10 \text{ mm}$ の時 ($l = 10 \text{ mm}$ 以上の時も含む)

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.5 \quad (5.10)$$

図12の場合について(Detonation波, 小口径0.3mm)には

$l = 5 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.22 + 0.36 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.11)$$

$l = 10 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.35 + 0.2 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.12)$$

$l = 20 \text{ mm}$ の時 ($l = 20 \text{ mm}$ 以上の時も含む)

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.45 + 0.1 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.13)$$

となり、図11と比較した場合、Detonation波の場合は、通常燃焼波に比して(5.7)式の $a_3 (\bar{\phi} - 1)$ の影響が出ることを示す。

図13の場合について(通常燃焼波小口径0.5mm)
 $l = 5 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.2 + 0.4 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.14)$$

$l = 10 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.25 + 0.1 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.15)$$

$l = 20 \text{ mm}$ の時 ($l = 20 \text{ mm}$ 以上の時も含む)

$$P = 0.8 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.4 \quad (5.16)$$

同じ通常燃焼波の場合でも、図11の通常燃焼波の場合と比較して(5.7)式に於ける a_2 を比較してみると図13の方が特に小孔入口附近で小さい。つまり入口附近の燃焼波の影響を受ける。

図14の場合には(Detonation波小口径0.5mm)
 $l = 10 \text{ mm}$ の時

$$P = 0.4 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.25 + 0.3 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.17)$$

$l = 20 \text{ mm}$ の時 ($l = 20 \text{ mm}$ 以上の時も含む)

$$P = 0.4 (\bar{\phi} - 1)^2 + 0.4 + 0.25 (\bar{\phi} - 1) \quad (5.18)$$

となり、図12の場合と比較して a_3 の影響は出やすくなっている。

次に減衰項を比較してみる。

つまり(5.7)式に於ける a_2 の項である。

a_2 の項は、図11の場合と図12の場合とを比較してみると明らかな如く、通常燃焼波の方がDetonation波に比して、小孔の内部にゆくにたがって早く一定の値になる。つまり通常燃焼波の方がDetonation波に比して小孔前の状態の影響をうけにくい。定性的な考察はDetonation波面の方がより高密度、高温のために、その影響が入口内部まで伝わるためである。

(5.8)~(5.18)に於て a_2 は l が長い時に大きくなるのは次の理由による。

(b), (イ)の定性的な検討のところで述べたように、入口の高温ガスの影響が内部にゆくにたがって減衰し、小孔入口では温度はたかし、より小孔内部に比して低圧のガスでも燃焼波が通る。よって a_2 は l の短い時小となる。又、小孔内部に於ては燃焼ガスの温度は入口附近より低くなり、よって a_2 は l の長い時大となる。

次に燃焼波の小孔前に於ける滞在期間による影響の項について論じたいと思う。

図11の通常燃焼波の場合と、図13の通常燃焼波の場合を比較すると、図13の場合の方が、つまり大口径の方が小孔入口前の影響をうけやすいのがわかる。

この事はDetonation波についても同様である。

次に同一口径の場合について調べると、例えば図11と図12とを比較した場合、図12の方がつまりDetonation波の方が小孔入口前の影響をうけやすいことがわかる。この事は図13.14の場合も同様である。

6 む す び

本実験では可燃ガスとして、プロパン、および酸素のEquivalence Ratioを0.5~1.5の割合とし、パイプ径 $\frac{1}{4}$ ~1 inch, ガス圧力を0.2~1 気圧の条件のもとでDetonation波のInduction Distanceおよび、小孔内への燃焼波の伝播の測定を行った。

その結果、次の結果が得られた。

(1)パイプ内のガス圧力とInduction Distanceの関係は混合比の如何に関せずほぼ反比例の関係が得られた。

(2)パイプ内をDetonation波が通過する場合、その速度は管壁と波面との間の熱伝達、或は摩擦によって影響を受け、この影響はパイプ内のガス密度が小さい程大きい。

(3)小孔前の燃焼ガスの状態が小孔内部の炎の伝播に対して影響を与えることが示された。その影響の程度はDetonation波の方が通常燃焼波に比して大きく、小口径が大きい程影響が大きく、酸素Rich側の場合の方が影響が大きい。

残された問題点とその意義

(1)パイプ内のガス圧力とInduction Distanceの関係は、ほぼ反比例の関係にあるが、定量的な理論は完成されておらず、今後の研究が待たれる。

(2)パイプ内をDetonation波が通過する場合、その速度は、管壁と波面との間の熱伝達、或は摩擦によって影響を受け、この影響についてはパイプ内のガス密度が小さい程大きいことが認められるが、定量的に完全な理論が出来上っているわけではなく、今後の研究が待たれる。

(3)小孔前の燃焼ガスの状態が、小孔内部の炎の伝播に影響を与えることが示され、影響の程度はDetonation波の方が通常燃焼波に比して大ではあるが、影響をおよぼす機構は複雑であり、現在の段階では明確に解明されていない。

終りに本研究の計画および実行に当り、終始御指導下さった宇宙研究グループ、第4研究グループリーダー 檜崎哲二技官及び角田支所鈴木昭夫室長に感謝の意を表す。

文 献

- (1) L.E. Bollinger
Formation of Detonation Waves in Hydrogen-oxygen Mixtures From 0.2 to 2 Atmospheres Initial Pressure in a 54 Meter Long Tube NASA TND-2256 PP24~36 1964
- (2) L.E. Bollinger, M.C. Fong,
F.A. Laughhey, and Rudolph Zdsce:
Experimental and Theoretical Studies on the Formation of Detonation Waves in Variable Geometry Tubes. NASA TN D-1983 PP-51-75 1963
- (3) Ia. B. Zelbovich and A.S. Kompaneets:
Theory of Detonation PP168-PP170 1960
- (4) Kistiakovsky, Knight, and Malin
Chem. Ppys. 20.5. 884 1952
- (5) Kistiakovsky, and Zinmann W.G. F
Chem. Ppys 23 1889 1955
- (6) A.E. Potter, Jr, and A.L. Berlad
A Thermal Equation for Flame Quenching NACA 1264 1956
- (7) B. Abraham.,
Flame Quenching by Variable-Width Rectangular-slot Burner as a Function of Pressure for Various Propane Oxygen-nitrogen Mixtures NACA RM E53 K30 1954
- (8) A.E. Potter, JR
Flame Quenching PP153-PP169
- (9) Ia. B. Zelbovich and A. S. Kompaneets
Theory of Detonation PP7-P111 1960
- (10) 日本機械学会 伝熱工学資料 P27 1962
- (11) 日本機械学会 伝熱工学資料 P92 1962
- (12) Mullins and Penner: *Explosions, Detonations, Flammability and Ignition P73-P74*

(13) 日本機械学会 伝熱工学資料

p72. 73. 1962

附録 ふく射伝熱の影響について

半径 L の半球状をなすガス塊が T_G の温度を保ち、その中心部に於ける黒体の小平面 dA に、ガス塊から発して dA に直接到達し吸収される量を dQ とする時、ガスふく射率は次式で定義される。¹³⁾

($L=25.4\text{cm}$, 温度 2000°C CO_2 分圧 0.43 H_2 0分圧 0.57 $\epsilon_G=0.012$)

$$dQ_G = \epsilon_G E_G dA (\text{Kcal}/h) = \frac{1}{36} \epsilon_G E_G A_G (\text{cal}/\text{sec}) \quad (\text{H. 1})$$

$$E_G = 4.88 (T_G/100)^4 (\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}) = \frac{1}{36} \times 10^{-3} 4.88 (T_G/100)^4 (\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) \quad (\text{H. 2})$$

したがってある広がりをもつガス塊の表面積 A_G から外の空間に対して発散されるふく射量 Q は、ガスの厚さとして平均の有効厚さ L をとり、これに対するガスのふく射率 ϵ_G とすれば、

$$Q_G = \epsilon_G E_G A_G (\text{Kcal}/h) = \frac{1}{36} \times \epsilon_G E_G A_G (\text{cal}/\text{sec}) \quad (\text{H. 3})$$

Detonation 波の場合は、 $T_G \sim 2000^\circ\text{K}$ であり、これを (H. 2) に代入すると、

$$E_G \sim 20 (\text{cal}/\text{sec} \cdot \text{cm}^2) \quad (\text{H. 4})$$

である。又デトネーション波用のパイプ径は 25.4 cm であり、パイプ長さによって 1 cm 分のパイプ内径の表面積は、

$$A_G \sim 2\pi \times 1.27 \sim 10 (\text{cm}^2)$$

$$Q_G \sim 0.012 \times 20 \times 10 \sim 2 (\text{cal}/\text{sec}) \quad (\text{H. 5})$$

理論混合比の場合、

Detonation 波の速度を大体 $2500\text{ m}/\text{sec}$ とし、パイプの断面積を $\pi \times (\frac{2.54}{2})^2 = 5.064\text{ cm}^2$ とすると、1秒間に燃焼するガスの体積は、パイプ径 1 inch (25.4 cm) の場合、

$$2500\text{ m} \times 5.064\text{ cm}^2 = 1266 \times 10^3\text{ cm}^3 \quad (\text{H. 6})$$

これだけのガスが Detonation 波面を通りすぎてゆくのである。これを小さく見積ってパイプ内ガス圧力が 0.1 気圧程度としても (この実験では 0.1 気圧が最低管内気圧)

$$\frac{1}{10} \times \frac{1266 \times 10^3 \times \text{cm}^3}{22.4 \times 10^3 \times \text{cm}^3} = 5.6 (\text{mol}) \quad (\text{H. 7})$$

なるガスが毎秒 Detonation 波面の前面から化学反応領域の後の領域へと移ってゆく。又 C , H_2 $\frac{1}{6}$ モルが、燃焼して出す熱量は、(管内 1 気圧の理論混合比の時 C , H_2 の分圧は $\frac{1}{6}$ モルである。

$$\frac{1}{6} \times 5.6 \times 531\text{ Kcal} = 2972 \times \frac{1}{6} \approx 500 (\text{Kcal}) \quad (\text{H. 8})$$

であり、波面の速度が $2500\text{ m}/\text{sec}$ であるなら、波面近くのパイプの長さの方向にそって 1 cm の長さを通過する時間は

$$1\text{ cm} / (2500 \times 10^2\text{ cm}/\text{sec}) \quad (\text{H. 9})$$

である。

なお (H. 8) は1秒間に波面を通りぬけていったガスが毎秒出すエネルギーであるが、(H. 9) 式に示す時間間に出すエネルギーは、

$$500\text{ Kcal}/\text{sec} \times (1\text{ cm} / (2500 \times 10^2\text{ cm}/\text{sec}))$$

であり、整理すると、

$$500 \times (1/2500 \times 10^2) (\text{Kcal}) \quad (\text{H. 10})$$

となる。

又波面近くの数 cm 当りのガス塊の出す熱量は、(H. 5) より、

$$Q_G \sim 2 (\text{cal}/\text{sec}) \quad (\text{H. 5})$$

なお (H. 10) は1秒間に波面近くの数 cm 当りの出す放射エネルギーであるが (H. 9) の時間に出すエネルギーは (H. 10) より、

$$2 (\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) \times 1\text{ cm} / (2500 \times 10^2\text{ cm}/\text{sec}) \quad (\text{H. 11})$$

であり、整理すると、 10 cm 当りならば、

$$2.0 \times (1/2500 \times 10^2) (\text{cal}) \quad (\text{H. 12})$$

となる。(H. 12) の (H. 10) に対する割合は

$$2 \times (1/2500 \times 10^2) \text{ cal} / 500 \times (1/2500 \times 10^2) \times 10^3 \text{ cal} \quad (\text{H. 12})$$

となり、この値を計算すると、

$$\text{約 } 0.0006 (\%) \quad (\text{H. 13})$$

となり、この値は熱伝達による損失に比してかなり小さい。しかもこの値はパイプ内圧 0.1 気圧の場合であり、さらに高気圧の場合には、放射による損失の割合はさらに低下する。よって速度 (デトネーション波) のエネルギー損失による低下は、熱伝達によるものとかんがえて定性的にはよいと考えられる。又熱伝達による熱損失の量と、発熱量との比は (25) より、

$$K' M'^{-0.2} Q/Q \approx 0.4 (0.1\text{ 気圧}) \\ 0.1 (1\text{ 気圧})$$

となる。

航空宇宙技術研究所報告394号

昭和49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 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
