

狭い間隙に進入する火炎の挙動に関する実験的研究*

小原 哲 郎^{*1}, 大八木 重 治^{*1}
仁 科 祐 介^{*2}, 成 澤 伸 之^{*2}Experimental Study on Behavior of a Flame
Entering into a Narrow ChannelTetsuro OBARA^{*3}, Shigeharu OHYAGI,
Yusuke NISHINA and Nobuyuki NARISAWA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A behavior of a flame propagating through a narrow channel is of importance, since this phenomenon is concerned with a quenching of the flame when heat losses by convective heat transfer or radiative one to a wall of channel are dominant and temperature behind the flame is not enough to increase that of unburned gases. Since, this phenomenon is also related to a safety-engineering problem where combustible gaseous mixture is handled, a device applying a narrow channel in a pipe might be one of useful technique to prevent the flame from propagating. Experiments were conducted to investigate a behavior of the flame propagating through a narrow channel, which connects two rectangular combustion chambers. The behavior of the flame was visualized using schlieren optical technique with an aid of high-speed video camera. In this study, an equivalence ratio of methane-air mixture, initial pressure and a width of the channel were varied in order to investigate effects of these parameters on characteristics of the flame propagation. As a result, the behavior of the flame entering into the narrow channel was classified into two phenomena, i.e. (i) the flame was quenched inside the narrow channel and combustion wave was not propagated into the downstream chamber, which results in just an emission of burned gaseous jet to the downstream chamber, (ii) the flame was propagated through the channel without quenching, which produced a high-pressure at both chambers.

Key Words: Combustion, Premixed Combustion, Combustion Phenomena, Pressure Wave, Flow Visualization

1. は じ め に

可燃性予混合気体中を伝ばする火炎が狭い間隙に進入した際には、物理的に興味深い現象が引き起こされる。まず、火炎は燃焼による熱量を火炎前方の未燃気体に熱伝導で伝えながら伝ばする機構である。したがって、火炎が間隙に進入した際には、既燃気体における熱量の一部が対流熱伝達およびふく射熱伝達機構によって間隙を構成する壁面へ伝達されるため、未燃気体へ移動する熱量は相対的に減少する。したがって、波面前方における予熱帯の温度が低下してその伝ば速度は減少し、間隙が十分長い場合には火炎は間隙内において消炎すると考えられる⁽¹⁾。また、間隙内では流れのレイノルズ数が小さく粘性の影響が顕著であるこ

とも、火炎を消炎させる一要因である。

一方、閉鎖された空間において燃焼する場合には、急速に膨張する既燃気体のピストン効果により火炎前方には圧力波が生成され、燃焼室内で反射を繰返すことになる。圧力波は未燃気体の音速で伝ばすることから火炎の伝ば速度の 10^2 倍のオーダーである。したがって、圧力波が間隙内を伝ばすることにより未燃気体の圧力は上昇するとともに未燃気体中に流れが誘起され、火炎の伝ば速度は速くなる。さらに、間隙上流の燃焼室では定容に近い燃焼状態になり圧力が上昇するため、間隙を伝ばする火炎は既燃気体の高圧によって押される形態となる。したがって、燃焼過程における圧力上昇の影響が顕著であれば、間隙幅が火炎に対して定義される消炎距離より小さい条件においても火炎は消炎せずに間隙を伝ばすると考えられる。すなわち、火炎が間隙に進入した際には、(i) 壁面への熱損失および粘性の影響により消炎に至る場合と、(ii) 既

* 原稿受付 2005年10月31日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。^{*2} 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: tobara@mech.saitama-u.ac.jp

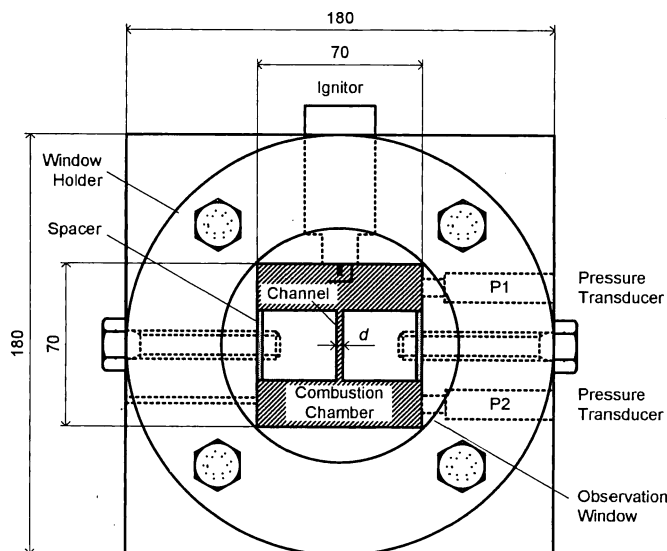


Fig. 1 Schematic diagram of combustion chamber ($70 \times 70 \times 40 \text{ mm}^3$). Chamber is divided into upper and lower section by a narrow channel (d : width of channel).

燃気体の圧力上昇にともない火炎の伝ばが促進される二つの効果が考えられ、これら要因の卓越により火炎の伝ば挙動は大きく異なると予想される。

これまでに、壁面における境界条件を変化させ、生成される火炎の形状や伝ば速度と消炎距離の関係が数値計算によって明らかにされている⁽²⁾⁽³⁾。また、消炎距離を明らかにするための実験がフラッシュバック法を用いて行われており⁽⁴⁾⁽⁵⁾、比較的広い空間から間隙に進入する際の火炎の消炎距離について確率的に求められている⁽⁵⁾。また、消炎距離と最小点火エネルギーとの相関⁽⁶⁾、定容容器内で発生させた火炎が壁面近傍において消炎する際の消炎距離が壁面材料を変化させることにより実験的に求められており、壁面への熱流束に対する消炎距離の関係が明らかにされている⁽⁷⁾。これまでの研究では、開放空間における火炎の消炎現象に着目した研究は多くあるが、現実には密閉された空間を火炎が伝ばする現象は多く存在する。したがって定容燃焼室内において圧力上昇を伴った場合の消炎現象について明らかにすることが重要と考えられる。

本論では、定容燃焼室の中央に間隙を設け、間隙上部において混合気体を点火した際に生成される火炎が間隙を伝ばする際の挙動についてシュリーレン光学系および高速度ビデオカメラを用いて可視化観察した。また、可視化観察と同時に燃焼室内の圧力計測を行った。混合気体の当量比 ϕ 、初期圧力 p_0 、間隙幅 d を変

化させて実験を行い、火炎の伝ば挙動に及ぼす影響について調べたので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1に実験に用いた燃焼容器の概略を示す。燃焼容器は真ちゅう製であり、幅 180 mm、高さ 180 mm、奥行 95 mm の大きさである。燃焼容器内部には、幅 70 mm、高さ 70 mm、奥行 40 mm の燃焼室が設けてある。すなわち、一辺が 70 mm の正方形にくり貫いた平板を光学ガラス (BK-7) が埋め込んでいる二枚の板で両側から挟み、ボルトで締結するサンドイッチ構造である。正方形にくり貫いた燃焼室内に幅 32 mm、高さ 30 mm、奥行 40 mm の真ちゅう製ブロックを燃焼容器の左右からボルトで固定することにより、燃焼室中心軸上に間隙を設けた。間隙幅 d を変化させるには、燃焼容器と真ちゅう製ブロックとの間にスペーサーを挿入した。この間隙により燃焼室は上部と下部に分離されることになり、それぞれの燃焼室を上室、下室と呼ぶことにする。実際に上室が鉛直上方になるように実験室に設置されている。上室および下室の容積はそれぞれ $5.32 \times 10^4 \text{ mm}^3$ で同一である。上室の中心軸上端には自動車エンジン用の点火プラグを取付け、混合気体を点火した。下室には混合気体および既燃気体の吸排気孔が設けられている。上室と下室の右側面にはひずみゲージ式圧力変換器 (NEC 三栄, 9E02-P5, 固有振動数 71 kHz) を燃焼室内壁に

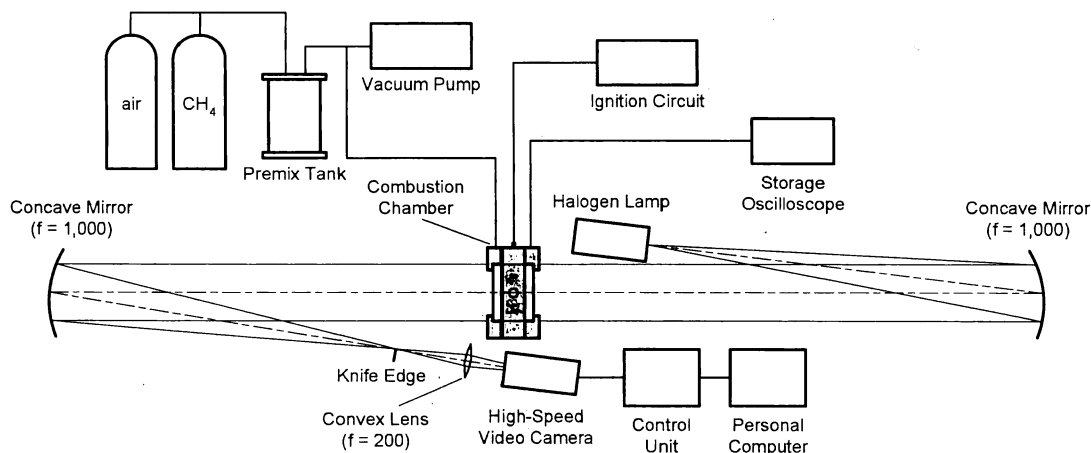


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up with schlieren optics.

Table 1 Experimental conditions of test gas.

Parameter	Conditions
Gaseous Mixture	CH ₄ + air
Equivalence Ratio, ϕ	0.8, 1.0, 1.2
Initial Pressure, p_0 [kPa]	30 ~ 101
Chamber Volume [10^5 mm ³]	1.96
Temperature	293 \pm 5 K

対して面一に取付けた。これら圧力変換器をそれぞれ P1, P2 と呼ぶ。

図2に実験装置全体の概略を示す。当量比から求められる分圧にしたがってメタンと空気をそれぞれ予混合タンクに充填し、約12時間程度拡散させてから実験に用いた。火炎が間隙を伝ばする挙動の観察には、ハロゲンランプ（モリテックス, MHF-G150LR）を光源とするシュリーレン光学系および高速度ビデオカメラ（フォトン, FASTCAM-MAX 120KC, 最高撮影速度 1.2×10^5 fps）を用いた。高速度ビデオカメラは、コマ間隔 $1/3000$ s, 解像度 512×512 ピクセルに設定し、映像を8 s間記録した後で燃焼過程の映像記録部分を抽出した。圧力変換器からの信号はストレージオシロスコープ（横河電機, DL-1540, サンプルング 200 MS/s）を用いて記録した。

2.2 実験方法 表1に供試気体の実験条件を示す。実験に用いた供試気体は、メタン-空気混合気体である。供試気体の当量比 ϕ は 0.8, 1.0, 1.2 の3条件とし、初期圧力 p_0 を 30~101 kPa の範囲で変化させた。間隙を構成するためのブロック容積を除いた燃焼室全体の容積は、 1.96×10^5 mm³ である。なお、実験は室温状態 (293 \pm 5 K) で行った。

Table 2 Experimental conditions of channel.

Parameter	Conditions
Distance, d [mm]	1.2, 1.6, 2.2
Length, L [mm]	30
Width, w [mm]	40
Volume [10^3 mm ³]	1.44, 1.92, 2.64

表2に実験に用いた間隙の諸量を示す。間隙幅 d を 1.2 mm, 1.6 mm, 2.2 mm の3条件で変化させた。間隙の長さを $L = 30$ mm, 奥行を $w = 40$ mm で一定としたため、間隙部分の体積はそれぞれ、 1.44×10^3 mm³, 1.92×10^3 mm³, 2.64×10^3 mm³ に相当する。

実験手順は次の通りである。まず、燃焼室内に真ちゅう製ブロックを取付け、間隙幅 d を設定する。次に、真空ポンプを用いて燃焼室内を一度真空にした後、設定圧力まで予め作成しておいた予混合気体を充填する。オシロスコープおよび高速度ビデオカメラをトリガ待ちの状態にした後、点火回路装置を用いて混合気体を点火させた。なお、高速度ビデオカメラの撮影時間は8 s間と長いため、燃焼終了後に手でトリガスイッチを押し、トリガ信号入力前後のビデオ映像を記録するセンタートリガ方式を用いた。燃焼終了後は、既燃気体を速やかに燃焼室から排気させた。

3. 実験結果

まず、火炎が間隙内を伝ばする場合と間隙内で消炎する場合の挙動について可視化観察を行った結果を中心に述べる。次に、供試気体の当量比 ϕ , 初期圧力 p_0 , 間隙幅 d を変化させ、火炎の伝ば・消炎現象に及ぼす影響について述べる。

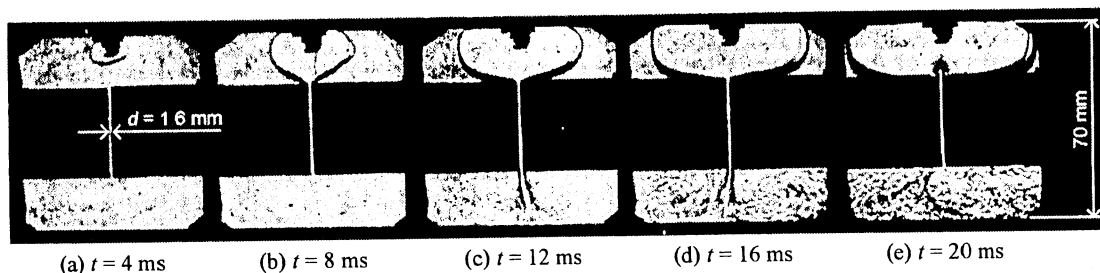


Fig. 3 Sequential schlieren photographs showing propagation processes of combustion wave through narrow channel, t : elapsed time from ignition ($\phi = 1.0$, $p_0 = 100$ kPa, $d = 1.6$ mm).

3.1 間隙を伝ばする場合 図3は、供試気体の当量比 $\phi = 1.0$ 、初期圧力 $p_0 = 100$ kPa、間隙幅 $d = 1.6$ mm の条件に対して得られた結果であり、火炎が間隙を伝ばした際に得られた時系列のシュリーレン写真である。写真のコマ間隔は 4 ms であり、点火からの経過時間 t をそれぞれの写真下部に示す。各コマの上部中心軸上に撮影される黒い影が点火電極である。図3(a)は点火から $t = 4$ ms 経過した際の火炎を示す。点火電極の影響により楕円形の火炎が形成されており、下方に向かって伝ばする様子が解る。上室においては、既燃気体の膨張により未燃気体が圧縮されるため、圧力波が火炎に先行して伝ばすると考えられるが、この圧力波は弱く画像から判断することは難しい。図3(b)では、火炎が間隙に近づくにつれて変形し、中心軸上の伝ば方向に対して凸の形状になる。また、火炎は間隙に吸込まれるようにして進入する。火炎が伝ばする現象は、波面静止座標系で考えるならば火炎面に対して未燃気体が流入することに等価である。火炎面が壁面に近づくとき、火炎面と壁面に挟まれた未燃気体は壁面によってその運動が拘束され火炎面に対して加速できないのに対し、間隙上の未燃気体は壁面の拘束がないことから火炎面に対して加速し流入することができる。したがって、火炎形状は図3(c)以降に示されるように時間経過とともに球形から大きく逸脱し楕円形に変形する。また、燃焼開始とともに火炎前方に未燃気体の流れが誘起され、間隙内へ加速し流入するので火炎も加速しながら間隙内へ進入する。図3(c)以降で火炎が下室内へと伝ばする様子が解る。火炎が間隙から下室へ伝ばする段階で発生する渦により、図3(d)において火炎はドーナツ状に拡がり、ほぼ下室全体に伝ばする。図3(e)では下室で燃焼が終了しており、その際の既燃気体が間隙を逆流し上室に噴射される様子が観察できる。この時刻においても上室では燃焼が終了していない。さらに、下室における火炎面上には乱れが多く観察され、上室における滑ら

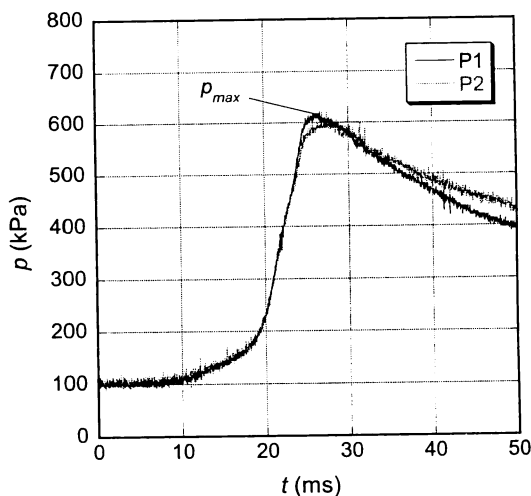


Fig. 4 Pressure histories simultaneously recorded with Fig. 3 ($\phi = 1.0$, $p_0 = 100$ kPa, $d = 1.6$ mm).

かな火炎面とは異なる様相を呈する。下室における燃焼時間は著しく短く、ビデオ映像を直接解析すれば火炎が間隙から流出してから約 8 ms で下室全体に拡がることが解り、上室における燃焼時間 $\tau \approx 26$ ms に比較し著しく短い。

図4は、図3に示したシュリーレン写真と同時計測された圧力波形であり、上室 P1 および下室 P2 における圧力の時間変化を示す。上下の燃焼室における圧力波形は、ほぼ同様の傾向を示し急峻に上昇する。燃焼過程において到達する最高圧力は $p_{max} \approx 600$ kPa であり、初期圧力の約 6 倍に相当する。点火から最高圧力に到達するまでの時間は、 $\tau \approx 26$ ms と見積もられる。図3に示したシュリーレン写真では、点火から $t = 20$ ms 程度で火炎が下室のほぼ全体に燃え拡がる様子が観察される。しかしながら、 $t = 20$ ms における圧力値は 200 kPa 程度であり、それ以降において圧

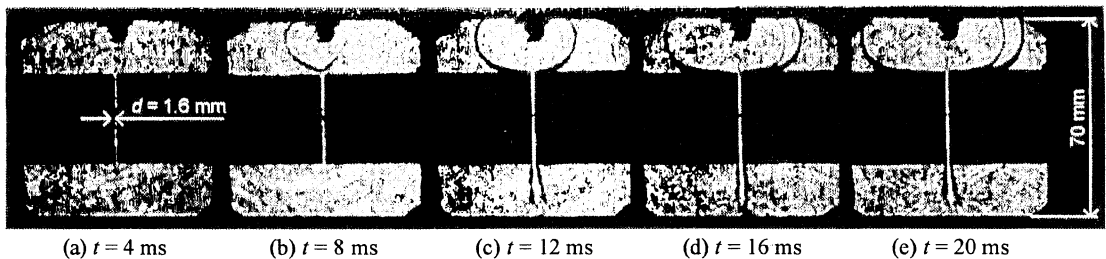


Fig. 5 Sequential schlieren photographs showing propagation processes of combustion wave through narrow channel, t : elapsed time from ignition ($\phi = 1.0$, $p_0 = 60$ kPa, $d = 1.6$ mm).

力は 600 kPa 程度にまで上昇する。これは、下室内の予混合気が燃焼した際の既燃ガスが間隙を逆流し、上室の未燃ガスを急速に燃焼させることによると考えられる。図 3(e) において上室の間隙部分に観察される密度変化は下室の既燃ガスが上室に噴射されることに起因する。また、上室と下室は間隙を介して接続されているため、上室の圧力上昇に伴い下室の圧力も上昇する。圧力は最高圧力に到達後、時間経過とともに緩やかに減少する。これは、火炎が燃焼室全体に伝ばした後、既燃ガスの熱量が燃焼室壁面および間隙を構成するブロックへと移動し熱損失が生じることに起因する。また、上室 P1 における圧力減少の速度は下室 P2 のものよりも若干大きい。これは、火炎が上室全体へと伝ばする時間は下室における燃焼時間よりも長く、この間に燃焼によって生じた熱量が燃焼容器壁面へ移動し熱損失量が増えるためと考えられる。

3.2 間隙内で消炎する場合 図 5 は、供試気体の初期圧力を $p_0 = 60$ kPa にした場合のシュリーレン写真であり、当量比および間隙幅は図 3 と同様である。図 5(a) では、点火電極の影響により火炎形状は球形から逸脱している。図 5(b) では、間隙上部における火炎が伝ば方向に凸形状に変形している。図 5(c) 以降で火炎は間隙内に進入しており、下室へと燃え広がる様子が解る。しかし、図 3 に示した初期圧力 $p_0 = 100$ kPa のシュリーレン写真と比較すると、下室内における燃焼状態は活発ではなく、後述する圧力波形の結果も考慮するならば、この場合には火炎は間隙内において消炎したと考えられる。すなわち、上室における既燃ガスが下室へと噴流として流入するのみであり、上室における火炎が下室へと伝ばしていないと考えられる。

図 6 は、図 5 に示したシュリーレン写真に同期して得られた圧力波形である。上室および下室における圧力の立上がりは緩慢であり、到達する最高圧力も $p_{max} = 150$ kPa 程度であり、初期圧力の 2.5 倍程度である。また、点火から最高圧力に達するまでの時間も

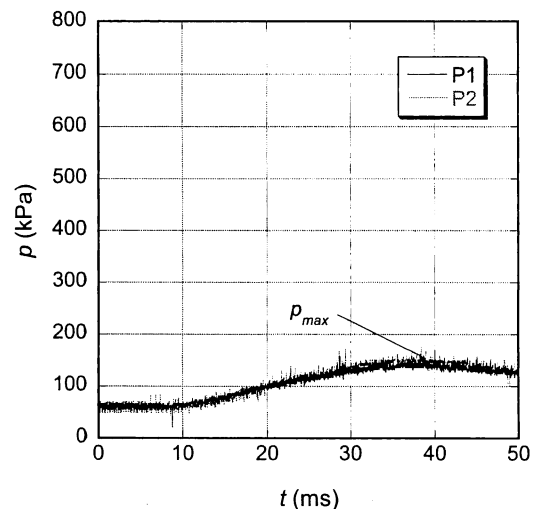


Fig. 6 Pressure histories simultaneously recorded with Fig. 5 ($\phi = 1.0$, $p_0 = 60$ kPa, $d = 1.6$ mm).

$\tau \approx 40$ ms となり、図 4 に示した $\tau \approx 26$ ms に比べて長い。したがって、供試気体の初期圧力を $p_0 = 60$ kPa に減じた条件では、上室における火炎は下室へと伝ばできず、間隙内において消炎したと考えられる。また、上室における既燃ガスが下室内に流入することによって圧力上昇が生じるが、その際に到達する最高圧力は初期圧力 $p_0 = 100$ kPa の場合に比較し著しく小さいことが解る。

3.3 火炎の伝ば・消炎による差異 図 7 は、供試気体の初期圧力 p_0 に対し燃焼過程において到達する最高圧力 p_{max} の関係を表す。横軸は初期圧力 p_0 、縦軸は最高圧力 p_{max} であり、上室 (○印) と下室 (□印) における値をそれぞれ示す。この図より、燃焼過程において到達する最高圧力には二つの異なる傾向がある。最高圧力 p_{max} は、初期圧力が $p_0 = 60 \sim 70$ kPa

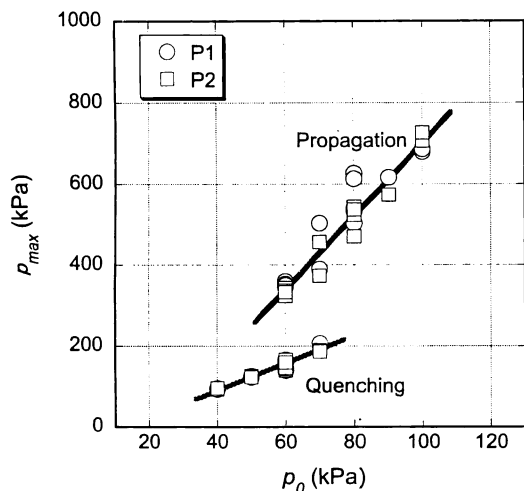


Fig. 7 Relationship between initial pressure p_0 and maximum pressure p_{max} obtained at upper and lower chamber ($\phi = 1.0$, $d = 1.6$ mm).

をしきい値とし、圧力が高い場合と低い場合の二つに分類される。シュリーレン映像の結果も考慮するならば、最高圧力が高い場合は火炎が間隙内で消失することなく伝ばした場合であり、最高圧力が低い場合は火炎が間隙内で消失した場合に分類される。火炎が下室に伝ばした場合、到達する最高圧力は初期圧力のおよそ 6 ~ 7 倍であるのに対し、消失した場合には 2 ~ 3 倍程度である。火炎が間隙内を伝ば・消失したかに関わらず、到達する最高圧力は初期圧力にほぼ比例する結果が得られた。初期圧力が $60 \leq p_0 \leq 70$ kPa の条件では、同条件で実験を行っているにも関わらず、火炎が消失する場合と伝ばする場合の両方が観察された。これは、混合気体を燃焼容器内に充填してから時間を一定にしていなかったため、容器内における混合気体の流動状態に差異があり、実験の再現性に影響を及ぼすためと考えられる。

図 8 は、間隙幅を $d = 2.2$ mm とした場合の同様の結果である。燃焼過程において到達する最高圧力が火炎の伝ばと消失で大きく異なる傾向については、図 7 と同様である。しかし、火炎が間隙内で消失する場合と伝ばする場合の両方が観察される初期圧力が $p_0 \approx 40$ kPa に減少する。これは、間隙幅を 2.2 mm に増加したこととともない間隙部分の体積が増加し、火炎背後における生成熱量も増加するため低い初期圧力でも火炎は間隙を伝ばすることができるためである。

図 9 は、間隙幅を $d = 1.2$ mm とした場合の同様の結果である。火炎が間隙内を伝ばする場合と消失す

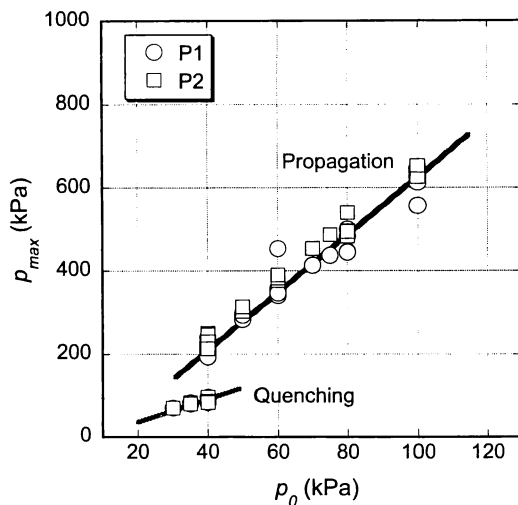


Fig. 8 Relationship between initial pressure p_0 and maximum pressure p_{max} obtained at upper and lower chamber ($\phi = 1.0$, $d = 2.2$ mm).

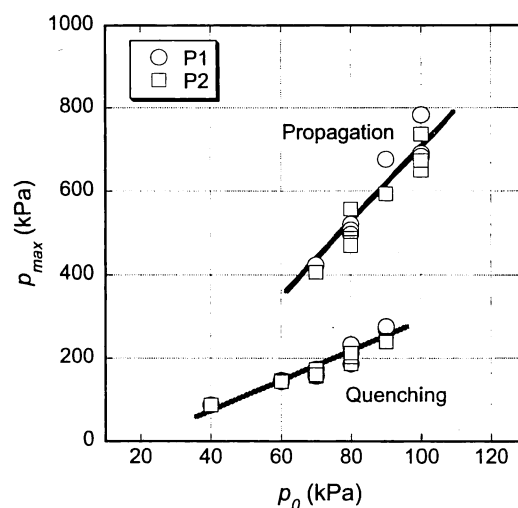


Fig. 9 Relationship between initial pressure p_0 and maximum pressure p_{max} obtained at upper and lower chamber ($\phi = 1.0$, $d = 1.2$ mm).

る場合の両方が観察される初期圧力は増加し、 $p_0 = 70 \sim 90$ kPa になる。これは、間隙幅が $d = 1.2$ mm と小さいため、火炎背後における生成熱量が小さく、初期圧力を高くし生成熱量を増加させなければ、火炎が伝ばできないことを意味する。

図 10 は、燃焼室中心軸上における火炎先端位置の点火電極中心から鉛直下方への距離 z と点火からの経過時間 t の関係を示し、間隙幅を $d = 2.2$ mm (○印)、

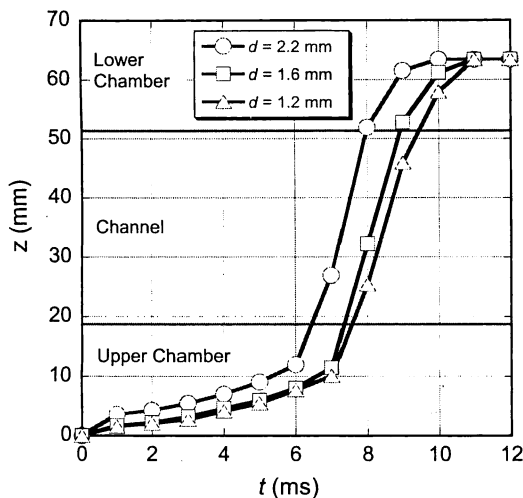


Fig. 10 Relationship between elapsed time from ignition t and distance of combustion front from ignitor z ($\phi = 1.0$, $p_0 = 100$ kPa).

$d = 1.6$ mm (□印), $d = 1.2$ mm (△印) と変化した場合の結果を示す。供試気体の当量比を $\phi = 1.0$ 、初期圧力を $p_0 = 100$ kPa とした場合である。点火電極からの距離 $19 \leq z \leq 51$ mm の区間が間隙内に相当する。上室における火炎の伝ば速度は小さく、間隙幅によって異なるが $1.3 \sim 2.0$ m/s 程度である。火炎が間隙内に進入する直前から火炎の伝ば速度は著しく増加する。これは、前述したように火炎前方に未燃気体の流れが誘起され、間隙内へ加速し流入するもので火炎も加速するためである。間隙内における火炎伝ば速度 V_f についても間隙幅によって異なり、 $d = 1.2$ mm の場合、 $V_f = 32$ m/s、 $d = 1.6$ mm の場合、 $V_f = 27$ m/s、 $d = 2.2$ mm の場合、 $V_f = 20$ m/s と見積もられ、間隙幅が小さくなるにつれて火炎の伝ば速度は増加する。これは、間隙幅が小さくなるほど火炎前方に誘起される未燃気体の流れが間隙内で加速されるためである。火炎が下室に進入すると前方の未燃気体により形成された渦輪に沿って伝ばするため、中心軸上の移動速度は低下する。

4. 考 察

前述したように火炎が間隙を伝ばする際、火炎の伝ばを妨げる要因として、間隙を構成する壁面への熱損失および粘性の影響が挙げられる。また、火炎の伝ばを促進する要因としては、火炎前方に誘起される流れ、定容燃焼することによる圧力上昇が挙げられる。ここ

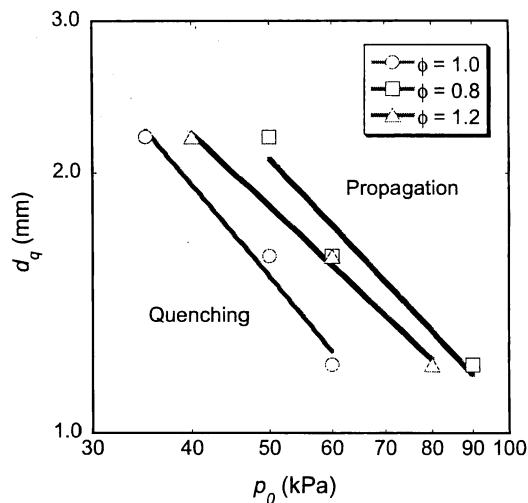


Fig. 11 Relationship between quenching distance of channel d_q and initial pressure p_0 to distinguish propagation or quenching.

では、火炎の消炎距離の圧力依存性について考察する。一般に層流燃焼速度 S_L の圧力依存性は反応次数を n として次式で表される⁽⁴⁾。

$$S_L \propto p^{n/2-1} \quad (1)$$

また、消炎距離 d_q は温度伝導率を α とすれば次式で表される⁽⁴⁾。

$$d_q \propto \frac{\alpha}{S_L} \propto \frac{\alpha}{p^{n/2-1}} \quad (2)$$

温度伝導率 α は圧力 p に逆比例することから、消炎距離 d_q は次式で示すように圧力 p の $n/2$ 乗に反比例する。

$$d_q \propto p^{-n/2} \quad (3)$$

図 11 は、供試気体の初期圧力 p_0 と消炎距離 d_q の関係を示し、横軸は初期圧力 p_0 の対数、縦軸は消炎距離 d_q の対数であり、当量比を $\phi = 1.0$ (○印)、 $\phi = 0.8$ (□印)、 $\phi = 1.2$ (△印) と変化した場合である。間隙幅が消炎距離 d_q を示す実線よりも大きい場合には火炎は間隙を伝ばし、消炎距離よりも小さい場合には間隙内で消炎したことを示す。図 11 より、どの当量比に対しても初期圧力を増加させることにより、消炎距離は減少することが解る。初期圧力 p_0 を大きくするほど、間隙を伝ばする火炎背後の既燃気体の体積が上昇

して発生する熱量も増加するため、間隙幅を小さくしなければ火炎が伝播することが解る。また、両対数グラフ上において消炎距離のデータは初期圧力に対してほぼ直線上に分布することから、消炎距離 d_q は初期圧力 p_0 のべき関数で表され、この傾向は式 (3) と定性的に一致する。図 11 における傾きから反応次数を推定するとほぼ $n \approx 2$ であり、燃焼速度から推定される値とほぼ一致する。供試気体の当量比を変化させた場合、どの初期圧力に対しても断熱火炎温度の最も高い $\phi = 1.0$ の場合に消炎距離が最も小さい。量論のメタン-空気混合気の消炎距離は約 2.1 mm と報告されていることから⁽⁸⁾、本実験によって得られた消炎距離はこれよりも短い。これは、定容燃焼室で燃焼した場合には既燃気体の膨張によって圧力波が火炎前方に形成されて初期圧力が上昇することによってと考えられる。さらに、圧力波が火炎前方を伝播することによって未燃気体が乱され、消炎距離が短くなると考えられる。

5. ま と め

定容燃焼室の中央に間隙を設け、間隙上部においてメタン-空気混合気体を点火した際に生成される火炎が間隙に進入した際の挙動について、供試気体の当量比、初期圧力、間隙幅を変化させて実験を行った。本論において得られた結果を以下に要約する。

- (1) 火炎が狭い間隙に進入した際の挙動は、火炎が間隙内で消炎せずに伝播する場合、火炎が間隙内において消炎し既燃気体が間隙から噴射される場合の二種類に分類されることを明らかにした。
- (2) 火炎が間隙を伝播した場合には、上下の燃焼室において圧力は急峻に立上がり、初期圧力の 6 ~ 7 倍に達する。一方、火炎が間隙内で消炎した場合には、圧力の立上がりは緩慢であり最高圧力は初期圧力の 2 ~ 3 倍程度となる。また、火炎の伝ば・消炎に関わらず、到達する最高圧力は初期圧力に

ほぼ比例する。

- (3) 火炎が間隙を伝播するしきい値となる消炎距離は初期圧力のべき関数で表される。定容燃焼によって生じた火炎が間隙を伝播する場合にも、消炎距離が初期圧力のべき関数に比例することを明らかにした。

謝 辞

本実験を行うにあたり、本学 吉橋 照夫 技師、本学大学院生 鈴木 文貴 君および本学学部生 篠崎 勇気 君の協力を得た。また、高速度ビデオカメラを用いた火炎の可視化観察には (株) フォトロン 古瀬 雅人 氏に協力して頂いた。ここに付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Niioka, T., et al., Fundamental of Combustion Phenomena, *Ohmsha*, (2001).
- (2) Lee, S.T. and Tsai, C.H., Numerical investigation of steady laminar flame propagation in a circular tube, *Combustion and Flame*, **99** (1994), 484-490.
- (3) Hackert, C.L., Ellzey, J.L. and Ezekoye, O.A., Effects of thermal boundary conditions on flame shape and quenching in ducts, *Combustion and Flame*, **112** (1998), 73-84.
- (4) von Elbe, B.L.G., Combustion, flames and explosions of gases, 3rd Ed., *Academic Press*, (1987), 240-336.
- (5) Ishizawa, S., et al., Estimation of flame quenching diameter by flush-back method, *Proc. of the Thirty-Seventh Japanese Symp. on Combustion*, (1999), 427-428.
- (6) JSME, JSME Combustion Handbook, *JSME*, (1995), 23-24.
- (7) Bellenoue, M., et al., Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **27** (2003), 323-331.
- (8) Mihalik, T.A., et al., The flammability limits of gaseous mixtures in porous media, *Proc. of 17th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, (1999), (CD-ROM, No. 102).