

Jan. 1983

RIIS-RR-31-1

UDC 536.46 : 614.839

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-31-1

細隙における消炎現象に関する研究

林 年 宏

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

細隙における消炎現象に関する研究

——細隙の大きさと長さが消炎に及ぼす影響——

林 年 宏*

Experimental Study on Flame Quenching by Narrow Holes

——Effect of Hole Diameter and Length of Flame Path on Flame Quenching——

by T. HAYASHI*

Flame quenching by solid surfaces has been studied by many workers, especially for the practical purpose of obtaining design data of flame arresters. Nevertheless, even a simple relation between hole diameter (D) and length of flame path (L) required for quenching has been not well known yet. This report intends to make some contribution for the basic understanding of quenching phenomena in narrow gaps.

Determinations are made, with variations of D and L , on quenching diameters under atmospheric conditions and also on limiting pressures of quenching under raised and reduced pressures. Two kinds of hole are tested respectively: glass tubes and brass plates with a single hole. Flammable mixtures tested are those with air of methane, hydrogen or propane.

Quenching diameters are determined by burner method (Fig.1). For a constant L , quenching diameter for a mixture is defined here as a mean value of a maximum hole diameter, which quenches flames in successive twenty tests, and a minimum hole diameter, through which at least one flame out of twenty tests passes. Some results are shown in Fig.3.

Limiting pressures of quenching are determined in a closed system shown in Fig.2: a hole under test is connected between an explosion chamber, in which explosions are originated, and a detection chamber which is embedded a thermocouple for the detection of flame transmission through the hole. It is known that the higher the initial pressure of the mixture is, the more easily a flame passes through the gap. The maximum initial pressure, below which no flame transmission occurs, is then a measure of quenching ability of the hole tested. This pressure is defined as "limiting pressure of quenching" by the hole, and means three successive quenchings in this report. The increments of initial pressure are 10mmHg for methane-air and 50mmHg for mixtures of hydrogen or propane, respectively. Some results are shown in Fig.4 and Fig.5. For holes drilled in brass plates (where $L \leq 10$ mm), observed relations between hole dimensions and limiting pressures are reasonable for all mixtures tested, but,

* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

for glass tubes ($25 \leq L \leq 100$ mm), effect of hole length on limiting pressure is not apparent with hydrogen-air mixtures.

From such curves as in Figs. 4 and 5, one can obtain informations on limiting dimensions of holes required for quenching of flames: when a linear line, which corresponds to limiting pressure of 760 mmHg, is drawn in parallel with a horizontal axis, intersections with experimental curves give combinations of L and D of holes just required for quenching of flames originated at an atmospheric initial pressure. For other pressures than atmospheric, relations between L and D are obtained through the same procedure.

For a range of short length of flame path ($L \leq 10$ mm), the limiting dimensions of holes for quenching of stoichiometric flames are interrelated by linear approximation. Results for limiting pressure of 760 mmHg are shown in Fig. 8. Taking account of the equality of slopes of linear lines in Fig. 8, and introducing the quenching diameter of each gas mixture, one may derive a following equation which stands approximately for all flammable gases tested:

$D = 0.03L + 0.44D_q$, where D_q is quenching diameter of the mixture. Similar approximations are applicable for pressures other than atmospheric, and those relations are expected to be useful for the design of flame arresters used in closed systems.

1. 緒 言

細隙による消炎現象は、そのメカニズムについてはまだ十分に解明されていないとしても、実用上は、配管等の内部を伝播する火炎を阻止するための火炎防止器（フレーム・アレスタ）や防爆電気機器のセーフ・ギャップの原理としてよく知られており、こうした応用面に関する研究は多い。筆者はこれまで、細隙による消炎現象を利用した火炎防止器の設計データを得る目的から、金網や焼結金属などの実用的な細隙集合体の消炎能力についてしらべてきたが、これらの結果を一般的に応用しようとする際には消炎現象の基本的特性についての理解が必要である。

本報では、最も単純な形状の細隙である単一円孔を対象として、その物理的・形状からみた消炎限界について論じた。大気圧下において測定される消炎径は消炎限界を定量的に示す代表的尺度のひとつであるが、本報では密閉系内における3種類の混合ガス（水素、メタンあるいはプロパンと空気）の火炎の伝播を阻止する限界について実験し、消炎径の実測値との関係、円孔の直径と奥行きが消炎に及ぼす効果などについて検討し、細隙による消炎の限界条件を簡単な数式により表現できることを示した。

2. 細隙寸法が消炎に及ぼす効果に関する一般的考察

2.1 細隙の大きさ及び長さの効果

細隙による消炎に最も影響する因子が細隙の大きさ（例えば直径）と長さ（奥行き）であることは直観的にも容易に理解される。すなわち、細隙において火炎を消滅させるためには、細隙の大きさ（本報では円孔による消炎を論ずるので細隙の大きさとしては直径を考え、以下これを D と略記する）が小さければ細隙の長さ（以下、 L と略記する）も小さくてよく、逆に D が大きければ L も大きくすべきであると考えられ、このことは理論的にも示されている。

細隙寸法と消炎の関係についての実験的証明としては Palmer¹⁾ の結果がよく知られており、彼は、管中を伝播する火炎が細隙により消炎するか否かは細隙に接近する火炎の伝播速度によることを示し、ある種の細隙については消炎する限界の火炎速度が L/D^2 に比例すると述べている。（換言すれば、ある速度で伝播する火炎を消滅させるのに必要な細隙の L と D の組合せは、 $L/D^2 =$

一定 という関係を満たせばよいことを意味する。）

Wilson²⁾ もこの考え方を踏襲して、消炎限界を L/D^2 を尺度として示すことを提唱している。一方、Potter³⁾ が引用しているように、Holm の古典的研究によれば、消炎を支配するのは D であって L は重要ではないという結果も得られている。細隙の L についてのこれらの一見矛盾する結果は、定性的には次のように説明される。（ただし、 $L/D^2 = \text{一定}$ が消炎の尺度であるとする Palmer の説の厳密性については別に論ずる必要があるので、ここでは単に、 D が一定であるならば L が大きいほど消炎しやすいという考え方であると理解することにする。）

消炎径は、燃焼限界内の組成の混合ガスを満たした管中を火炎が伝播しない限界の管径と定義され、混合ガスの圧力が大気圧に保持された状態において測定される。消炎径の測定法は幾つかあるが、本報ではバーナ法による消炎径を考える。この方法では、（垂直に保持した）管の下方から混合ガスを流し、流量を調節しながら開放上端において点火する。定常なバーナ炎が形成されたのち混合ガスの供給を断ち、火炎が管内に伝播する（逆火する）か否かを観察する。種々の径の管についてテストし、逆火しない限界をもって消炎径とする。従って、限界付近において管径をどの程度細かく変化させ得るかによって消炎径の精度が決まる。こうした限界径を求める過程においては、一般に次の3種類の火炎挙動が観察される：（1）管径 D が十分に大きいときは、火炎は容易に管中に入り、混合ガスが存在する限り無限に伝播する。（2） D が消炎径より僅かに大きいときは、逆火は生ずるが、ある有限の距離を伝播したのち消滅する。（3） D が十分に小さければ、火炎は管端において消滅する。いま仮りに、（1）及び（3）の現象に相応するような径 D_1 及び D_2 の管を用いて消炎径を求めたとすれば、前述の Holm のように、管長 L は消炎には無関係であるという結論が導かれることになる。また、（2）の現象に注目したとすれば、 D も L もともに消炎の要因であって、この両者の間には何らかの関係が存在すべきであるという Palmer の推論が成り立つ。

ところで、既に述べたように消炎径は大気圧下において定義されるが、これをもう少し厳密に言えば、火炎が管中に逆火したときの火炎背後の圧力が一定（大気圧）に保持されるという条件を意味する。このような条件下では、火炎はその形状（外観的にはほぼ半球状）を変えずに一定速度で伝播する（uniform movement）。これと同様の条件が満足されるような加圧された空間がもし得られたとすれば、この空間において測定される消炎径は加

圧下における消炎径と定義することができるが^{*1}、その際に観察される消炎挙動もまた上述の(1)～(3)のように分類されるであろう。ただし、消炎径は空間内の圧力が高いほど小さくなることが予測される。一方、管中の火炎伝播が uniform movement となることは実際には稀であり、実用上の火炎防止器の対象となるような火炎伝播に際しては配管内の圧力は大気圧よりも高くなるのが普通である。従って、細隙の大きさが大気圧下の消炎径に等しければ消炎の目的を達することはできない。つまり、細隙の大きさはいわゆる消炎径よりも充分小さいことが必要であり、Palmer の実験式もそうした範囲内において適用されるべき性質のものであるが、経験則としては、細隙径は消炎径の 1/2 以下とすべきだとされている。本報ではこの 1/2 という比率の意味についても検討する。

2.2 極限条件における消炎に関する推測

消炎径は、その定義において L の効果を必ずしも明確に考慮していないが、実際上は L に無関係に（つまり、 L が充分小さいときにも）消炎する限界径と解される。この意味では、 L がゼロに近い場合の挙動こそが消炎の本質であるとも考えられる。

いま、Palmer の消炎尺度 $L/D^2 = \text{一定}$ を次式のように書くと、 $L=0$ のときは $D=0$ （細隙の無い状態）で

$$L = k_1 D^2 \quad (k_1 \text{ は定数})$$

はじめて消炎することになる。もちろん、実際上は $L=0$ ということは無意味かも知れないが、例えばへりを鋭いナイフエッジに仕上げたオリフィス板を想定して、この孔径が充分小さければ消炎は可能のように思える^{*2}。これについてはのちに再び論ずるが、 L が小さい場合における適用性という意味では Palmer の説に対する疑問は次のように述べることもできる。

細隙により消炎できる限界の火炎速度を v 、 k_2 を細隙の構造などによる定数とすれば、Palmer の実験式は次のように書ける：

$$v = k_2 L / D^2$$

この式によれば、 $L=0$ ならば $v=0$ でなければならない。 $v=0$ とは、見掛け上火炎が伝播しない状態を意味す

るが、これには二つの場合がある。ひとつは、管中において火炎が静止する場合であるが、このような状態が生じ得るか否かは別として、細隙から隔たった位置に静止した火炎について論ずることはここでは無意味である。 $v=0$ となるもうひとつの場合は、混合ガス中を火炎が伝播しないこと、つまり混合ガスの組成が燃焼限界外にあることを意味する。燃焼限界内で限界に近い組成の混合ガスの燃焼速度は有限な値をとり、この値は必ずしもゼロに近い値ではない^{*3}。従って、実際上は $v=0$ という状態もまた論議の外に置かれる。そこで、前と同様にナイフエッジを有するオリフィスを考えると、例えば燃焼限界付近の組成の混合ガスの火炎は、 D が充分に小さければ（火炎速度がゼロよりも充分に大きいにもかかわらず）このオリフィスによって消炎することはあり得ると考えられる。

本節では L がゼロに近い場合のみを論じたが、単にこの結果だけからみても、消炎の限界条件における L と D の関係は例えば $L/D^2 = \text{一定}$ という尺度によって一律に表現できるものではなく、 L 又は D の絶対値によって異なる関係を示すことが予測される。

3. 実 験

3.1 細隙の寸法

細隙としては、単一円孔を有する真鍮板及びガラス管（単管）を用いた。真鍮板は一辺約 3 cm の矩形で、板厚（円孔の奥行き）は 1, 5 及び 10 mm の 3 種類とした。板には固定ネジ用の 4 個の穴と、それらの中心に細隙としての円孔を機械加工によりあけてある。円孔の直径は 0.1 mm 刻みで変えたが、直径が 3 mm を超えるものについては 0.2 mm 刻みとした。なお、加工上の理由により、最小直径は板厚が 1, 5 及び 10 mm についてそれぞれ 0.2, 0.4 及び 0.7 mm である。機械加工による円孔は必ずしも真円ではないが、板の両表面においてそれぞれ 2 方向について読取り顕微鏡を用いて 100 分の 1 mm 単位で直径を測定し、4 個の測定値の算術平均をもって円孔の直径とした^{*4}。円孔の内部表面の粗滑度については考慮しなかった。

ガラス管は市販品を用い、砥石式切断機を用いて定尺

^{*1} 実際に加圧下の消炎径を測定することは困難であろう。

^{*2} この場合、壁面の効果によって消炎するというメカニズムは修正する必要があるかもしれない。例えば、円孔から火炎（あるいは熱ガス）が噴出したとすると、そこで急激に広がることにより温度の低下（あるいはエネルギー密度の低下）が生じ、未燃ガスに着火しないことが考えられる。

^{*3} その混合ガスの最大燃焼速度がゼロより充分大きいことを認めるならば、それとの相対的比較において、限界付近での燃焼速度もゼロより充分大きい。なお、伝播初期の火炎速度は燃焼速度のオーダーである。

^{*4} 4 個の測定値の最大値と最小値の差は、大部分の場合 0.04 mm 以下であった。

物から所定の長さに切り出し、真鍮製のホルダー内に固定して実験に供した。対辺長 26 mm の六角棒を加工したホルダーの長手方向中心には、ガラス管の外径よりやや大きい直径の穴を貫通させ、ここにガラス管を挿入し、管とホルダー内壁との間隙にはエポキシ系接着剤を充填して固定する。ホルダーの両端には接続用オネジを加工し、全長は供試ガラス管の長さより約 1 mm 短かい設計とする (Fig.1 参照)^{*5}。ガラス管の長さは、それぞれの内径について約 25, 50, 75 及び 100 mm としたが、一部の実験ではこれら以外の管長のものも用いた。管の断面はほとんど真円であると観察された。また、一本の定尺物については、どの部分を切断しても内径はほぼ同じであった^{*6}。入手できた管の内径は、公称値が 0.2~0.6 mm の範囲では約 0.1 mm 刻みであるが、0.8~2 mm の範囲では約 0.2 mm 刻み、2 mm を超えるものでは約 0.5 mm 刻みである。内径の決定に際しては、上述の 4 種類の長さのものの両端の内径について真鍮板の場合と同様の測定を行い、これらの平均値をもって内径とした。

以下の文中においては、真鍮板の厚さ又はガラス管の長さを $L(\text{mm})$ 、円孔の直径又はガラス管の内径を $D(\text{mm})$ と略記することがある。

3.2 実験ガス

実験に用いた水素は市販純度のもの、メタン及びプロパンは pure grade のものである。これらのガスを大気条件の空気と分圧方式により混合し、干渉計式ガス濃度計により濃度を測定したのち実験に供した。メタン及び水素は数種類の濃度について実験したが、プロパンについては、従来の知見からみて最も消炎しにくいと考えられる濃度 (4.5%) で実験した。ガス濃度は容量%で示すが、場合によっては当量濃度との比 (当量比, ϕ) で示すことがある。

なお、水素は最も消炎しにくいガスのひとつであり、メタンは逆に最も消炎しやすいガスの代表である。また、プロパンは、多くの炭化水素ガスや溶剤蒸気を代表する消炎挙動を示すとされているガスである。

3.3 消炎径の測定

消炎径の測定は 2.1 で述べたバーナ法によったが、バーナ炎を形成させる細隙部の構造は Fig.1 のとおりで

ある。円孔を有する真鍮板は、消炎径よりも充分に大きい内径を有する検出部に、ゴムパッキンを介して接続する。ガラス管は、先に述べたホルダー内に固定し、ホルダー端部のネジ (M 18, P 1.5) により検出部に接続する。

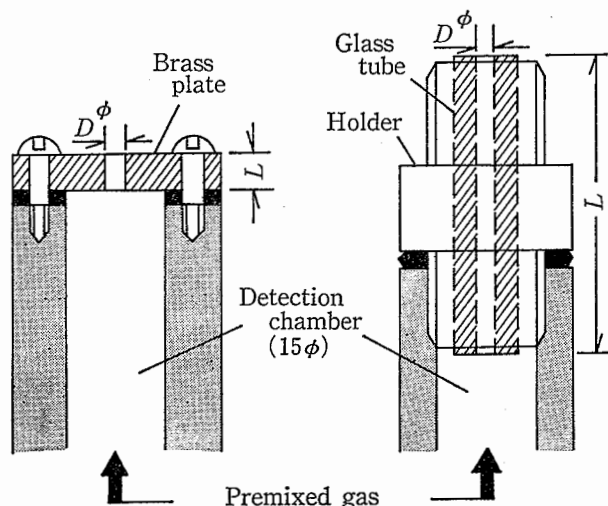


Fig. 1 Apparatus for measurements of quenching diameter (schematic cross section)
消炎径測定装置

検出部下方から適量の混合ガスを流しながら点火すれば、円孔上にバーナ炎が形成される。このときの火炎の外表面積を $A(\text{cm}^2)$ 、ガス流量を $Q(\text{cm}^3/\text{sec})$ とすれば、混合ガスの燃焼速度 S は次式で示される：

$$S = Q/A$$

S は混合ガスの濃度、温度及び圧力によって決まる値であるから、この式は、 Q とともに A が変化し得ることを示している。実際には、流量を少し変えると、それによって外観上の火炎の形状も変化するが、バーナ炎は消えずに保持される。この実験では火炎の形状と逆火の難易についての厳密な検討は行わなかったが、毎回のテストに際してガス流量を一定に調節することはかなり困難であるので、事実上流量がある程度変化したとみなすことができる。(なお、予備実験によれば、流量過多により吹き消える直前の流量において火炎を維持したあとのほうが消炎しにくかったので、これを考慮して実験した。)

毎回のテストでは、バーナ炎の形成後 2~3 秒間その火炎を維持し、次いで手動ニードル弁を操作してガスの供給を断ち、逆火の有無を観察した。バーナ炎による真鍮板やガラス管の温度上昇の影響と、弁を閉じる速度の影響は無視した。同一の細隙について 20 回のテストを行い、検出部に 1 回も火炎を生じなければ「消炎した」とする。検出部に火炎が観察されたときは、その頻度や

^{*5} 火炎がガラス管よりも先にホルダーに触れることを避けるためである。

^{*6} いずれのガラス管についても、内径の最大と最小の差は 0.03 mm 以下であった。

弁の閉止からの時間遅れにはかわりなく「逆火した」とする。検出部への逆火の有無は主として熱電対の出力によって判定した。

D と L を変えて実験し「消炎」と「逆火」の限界寸法を求め、それぞれの L について、消炎する最大径と逆火する最小径の算術平均をもってテストした混合ガスの消炎径とした。なお、実験は長期間にわたって行ったが、その間における大気の大気圧及び温度の変動の影響は無視した。このことは、次節の密閉系における実験の場合も同様である。

3.4 密閉系における消炎実験

3.4.1 実験の意義

配管等の内部における火炎伝播の様相はガスの種類によって著しく異なる。すなわち、水素などの燃焼速度が大きいガスは伝播距離とともに漸増的に火炎速度を増し、比較的短い距離を伝播したのち爆ごうへ転移する。一方、メタンのような燃焼速度が小さいガスの場合は、伝播距離と火炎速度の関係は一定せず、一般にはむしろ火炎速度を増減しながら伝播するとみたほうがよい。従って、管中を伝播する火炎について、火炎速度をもとにしてすべてのガスの消炎挙動を論ずることには無理があるように思える。実験的な手法についても、メタンのように脈動する火炎の場合は、火炎速度の定義及び測定法に曖昧さが残る。また、現象の再現性からみて、消炎の尺度として用いる火炎速度を連続的かつ任意に変化させることは殆んど不可能である。

一方、例えば直径と長さの比が1に近い円筒状密閉容器中の爆発は、その爆発圧力の測定などから知られているように現象の再現性はよい。また、混合ガスの点火前の圧力（初圧という）は任意に、かつ連続的に変えることができ、初圧に応じて爆発の（火炎の）強さも変わると考えることができる。更に、こうした特徴はガスの種類には無関係であるので、ガス相互の挙動を比較するのに都合がよい。これらのことから、本報では火炎速度ではなく、混合ガスの初圧を消炎の尺度とした。すなわち、二つの密閉容器を細隙で連結し、一方の容器中で生じた火炎が他方へ伝播するか否かを観察し、消炎する限界の初圧を消炎限界圧力（Limiting pressure of quenching）と定義して細隙による消炎の尺度とした。

なお、管中を伝播する火炎の場合には、爆発圧力は一般に振動波形を示し、かつ、その最大値は上述のような円筒容器中の爆発圧力よりも小さいので、火炎を背後から押す圧力（あるいは火炎前方の未燃ガスの圧力）が高いほど消炎が困難であると仮定すれば、このような方法

で求めた消炎限界は管中を伝播する火炎（ただし、爆ごうを生ずるような場合を除く）を消炎できる細隙（ D ）よりも大きくはならないと考えられる。

3.4.2 実験容器

実験容器は、火炎を生ぜしめる爆発室と、細隙による消炎の有無を確認するための検出部からなり、両者を連結する細隙の取付構造は Fig.2 のとおりである。爆発室上端は取外し可能なフランジ接続であるが、この上端フランジには、直径 70 mm のピッチ円上に 3 箇所等間隔にメネジ（M18）を貫通させてある。このメネジは、Fig.1 に示したガラス管ホルダー、あるいは、真鍮板を用いるときの検出部を接続するためのものである。ガラス管ホルダーの接続ネジの長さは、ホルダーを接続したときのガラス管の下端がフランジの内側表面とほぼつらいつらになるようにしてある。また、フランジの内側には、真鍮板を（その中心が M18 の貫通メネジの中心と一致するように）取付けるための袋ネジ（M3）を、それぞれの貫通ネジの周囲に 4 箇所ずつ加工してある。なお、この方法により真鍮板を取付けると、点火源から円孔入口までの距離は板の厚さによって異なるが、その影響については無視した。

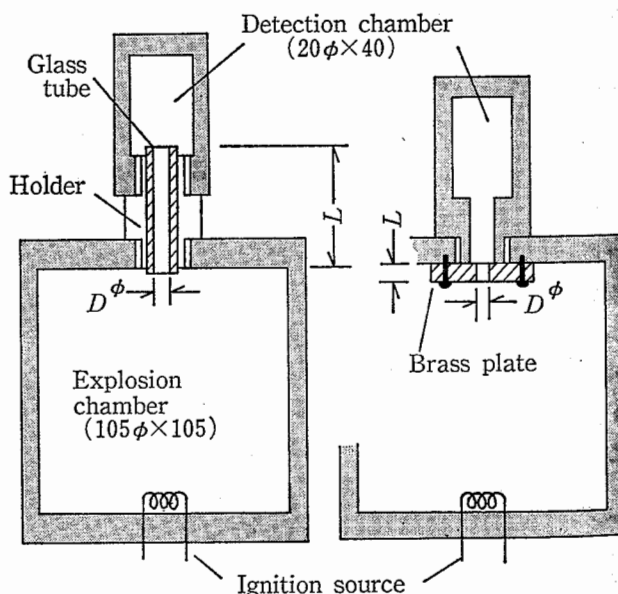


Fig. 2 Apparatus for determination of limiting pressure of quenching by glass tube (left) or brass plate (right)
消炎限界圧力測定のための実験装置

検出部は、ガラス管による消炎実験ではホルダー上端のネジにより接続するが、真鍮板を用いる実験では爆発室上端フランジに検出部を直接ねじ込む構造としてある。なお、図には省略したが、検出部には火炎検出用の熱電対及びホトトランジスタが埋込まれている。

3.4.3 実験方法

毎回の実験においては、テストするガラス管又は真鍮板を爆発室と検出部の間に取付け、系全体を1 mmHg (絶対圧) 以下の真空としたのち予混合された実験ガスを所定の圧力にまで満たし、爆発室下端中心に設けたニクロム線ヒータにより点火する。検出部に火炎を生じたときを「引火した」、逆の場合を「消炎した」と呼ぶことにし、消炎する最高の初圧を求めた。

他の条件が同じであれば初圧の高いほうが引火しやすいこと及び、ある初圧で引火しなくてもそれより高い初圧で引火したあと再びその初圧でテストすると引火することがあることがわかっているため、消炎限界圧力は次のようにして求めた。まず最初はその日の大気圧に等しい初圧でテストし、もし引火しなければ初圧を200 mmHg ずつ高くしてゆき (ただし、最高圧力は大気圧プラス760 mmHg とする)、引火すれば初圧を100 mmHg 下げてテストする。初圧が大気圧で引火したときは、100 mmHg ずつ初圧を下げてゆき、消炎すれば初圧を50 mmHg 高めてテストする。このように、引火すれば初圧を下げ、消炎すれば初圧を高めるという手順を交互に重ねて限界圧力を求めるが、その手順を詳述することは複雑過ぎるので省略する。この手順は水素とプロパンでは同じであるが、メタンでは初圧の刻みに違いがある。すなわち、いずれのガスについても、ある初圧で連続して3回消炎したときにこれを消炎限界圧力としたことは同じであるが、初圧の刻みはメタンでは10 mmHg、水素及びプロパンでは50 mmHg である (つまり、例えばメタンについては、消炎限界圧力より10 mmHg 高い初圧では3回のテストのうち少なくとも1回は引火したことを意味する)。なお、消炎限界圧力は mmHg 単位の絶対圧で示した。

4. 実験結果

4.1 消炎径

消炎径の測定結果の一部を Fig. 3 に示す。本報では、消炎する最大径と逆火する最小径の平均値を消炎径としたので、消炎に及ぼす L の効果を論ずるためには L が異なっても D の刻みが同一でなければならない。真鍮板ではこの条件が厳密には満たされていないが、実験の範囲では、混合ガスの濃度が当量値に近いところでは L の効果は殆んどなく、当量濃度からはずれたところで幾らか L の効果が認められた。ガラス管の場合には D の刻みは L によらないが、 D の刻みが大きいことから予測されるように、 L の効果は殆んどみられなかった。

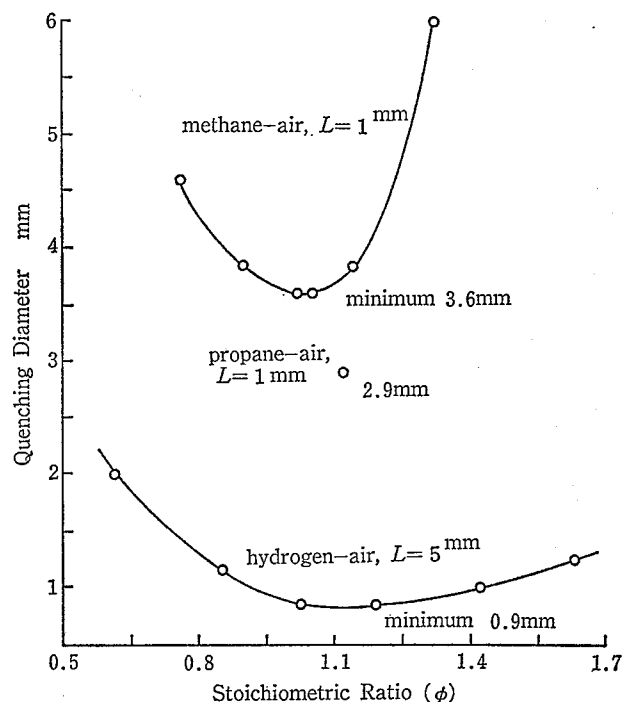


Fig. 3 Effect of mixture composition on quenching diameter (for brass plate)
混合ガスの組成が消炎径に及ぼす影響

例えばメタンについては、真鍮板の場合は8.5~11%の濃度では L の効果はなく、7.2及び12.5%においては L を10倍にしたときの消炎径の差はそれぞれ0.4及び1.3 mmであった。消炎径の最小値は3.55 mmであるが、実際上は3.6 mmにおいても消炎すると考えてよい。ガラス管の場合における濃度の影響は真鍮板の場合と同じ傾向を示し、当量濃度付近では L の効果はなく、 D が3.5で消炎、4.0で逆火したので最小の消炎径は3.75 mmとなった。

水素の場合には L の効果は殆んどみられなかった。真鍮板では、テストした D の刻みが L によって異なったことの影響が現われて、消炎径の最小値は $L=1$ のとき0.91, $L=5$ のとき0.86という結果になったが、他の濃度においても L による消炎径の差は0.1 mm以下であった。 $L \geq 25$ (ガラス管) の場合は、各濃度について消炎径は L によらない値となり、その最小値は0.91 mmであるが、水素濃度が18及び57%における消炎径は最小値の約2倍の1.8 mmであった。なお、消炎径とガス濃度の関係を示す曲線は真鍮板とガラス管について殆んど同じ形となることから、水素の場合には L の効果はなく、また、テストした2種類の細隙については壁面の影響もないと結論される。

4.5% プロパン-空気混合物については、 $L=1, 5$ 及び10 mm に対する消炎径がそれぞれ2.91, 2.98 及び

3.17 mm となり、 L の効果が幾らかみられた。ガラス管については、消炎径は L によらず 2.75 mm となったが、テストした管の径からみてこの値は実際に消炎する径よりも小さめであると考えられる。

緒言に述べたように、本報の目的は消炎径の測定そのものではなく、消炎径と密閉系における消炎限界細隙寸法の関係をしらべることにある。消炎径の測定における火炎伝播は、一端が大気に開放された管中への火炎の侵入という形態であり、およそ管中の火炎伝播のうちでは最も弱い（消炎されやすい）火炎であるが、こうした条件下の消炎と、密閉加圧系における爆発火炎の消炎挙動とを関連づけることができれば、消炎径の測定は比較的容易であるから、実用上の火災防止器の設計などに役立つことが大きいと考えられる。このような意味では、同じ組成の混合ガスと、同じ種類・寸法の細隙について消炎挙動を比較することが重要なのであって、従来報告されている消炎径を利用しない理由及び、プロパンについては上述の測定値が必ずしも消炎径の最小値ではなくても差支えない理由も明らかであろう。なお、上述の結果から、以後の論議においてはメタン、水素及びプロパンの消炎径をそれぞれ 3.6, 0.9 及び 2.9 mm とするが、参考のために当量濃度における消炎径の文献値⁹⁾を示せば、これらのガスについてそれぞれ 3.3~3.8, 0.77~0.98 及び 2.7~3.5 mm であり、本報での測定結果とよい一致を示している。

4.2 密閉系における消炎限界圧力

真鍮板の孔径 D と消炎限界圧力（以下、単に限界圧力ということがある）の関係の例を Fig. 4 に示す。 D の増大とともに限界圧力は減少するが、減少の割合は D の大きさによって異なる。これらの曲線は、 D を更に大きくすれば、最終的にはそれぞれの混合ガスの着火限界圧力に収れんするはずであるが、本報ではそうした低圧領域についてまでは実験しなかった。ガスの種類又は濃度が変われば、 D による限界圧力の減少の仕方が異なり、また、横軸方向への曲線群の移動がみられるが、 $L=1, 5$ 及び 10 についての 3 本の曲線相互の間隔は似たような傾向にある。Fig. 5 はガラス管についての結果の例であるが、この場合は D を一定として L を変化させたときの限界圧力であって、曲線の意味は真鍮板の場合とは異なる。この図の各曲線は、 L をゼロに近づけることによりその混合ガスの着火限界圧力に収れんするであろう。ガラス管を用いての実験はメタンと水素について行ったが、メタンの場合には L の増大により限界圧力が高くなるという関係がみられたものの、水素の場合

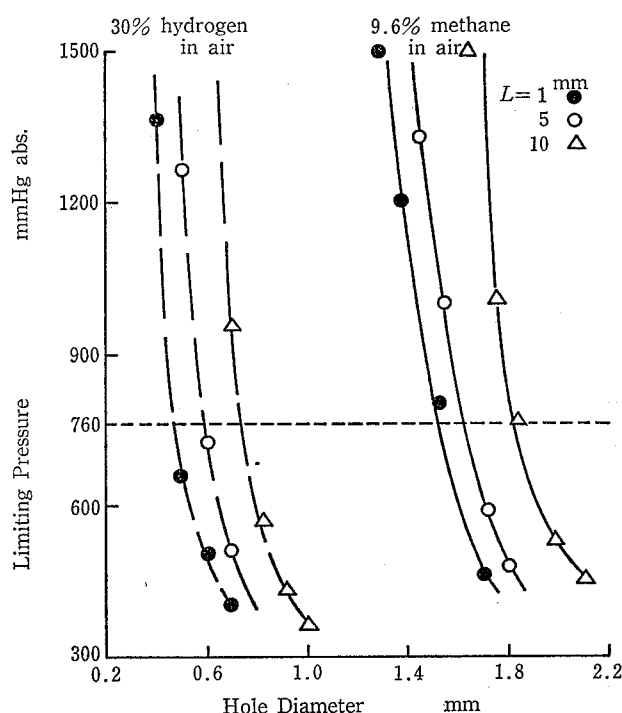


Fig. 4 Effect of diameter of a hole in brass plate on limiting pressure of quenching with variations of plate thickness (L)
真鍮板の孔径が消炎限界圧力に及ぼす影響

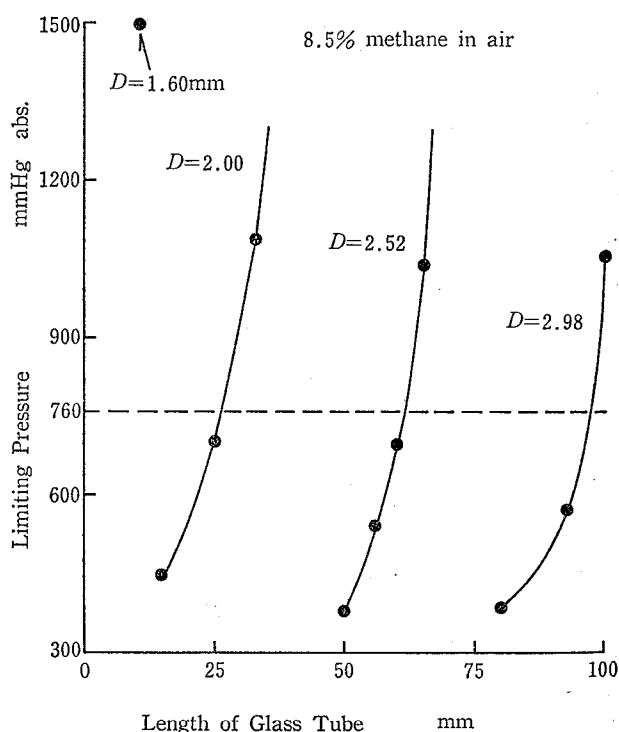


Fig. 5 Effect of glass tube length on limiting pressure of quenching for various hole diameter (D)
ガラス管の長さが消炎限界圧力に及ぼす影響

には、相当数の実験を試みたにもかかわらず、 L と限界圧力の間には一定の関係が認められなかった。

先に述べたように (Fig. 2), 爆発容器上端フランジには細隙を取付けるための貫通ネジが3箇所加工されているが、実験ではこの3箇所について交互に細隙の取付け位置を変え、同一の細隙について3回の測定を行った。Fig. 4 及び 5 の各曲線は、これら3回の測定により得られた限界圧力のうちの最小値をそれぞれ結んだものである。

Fig. 4 及び 5 においては、横軸に平行に引いた直線と各曲線との交点は、同じ初圧の混合ガスの火炎を消炎させるのに必要な L と D の組合わせを与える。すなわち、ある混合ガスについて、同じ条件下で伝播する火炎の消炎に必要な L と D の関係を求めることができる。図には限界圧力が 760 mmHg (平均的な大気圧) の場合を破線で示したが、以後の論議においては、このようにして求めた L と D を用いて、初圧が大気圧のときの火炎を消炎できる細隙の寸法について主として考察する。

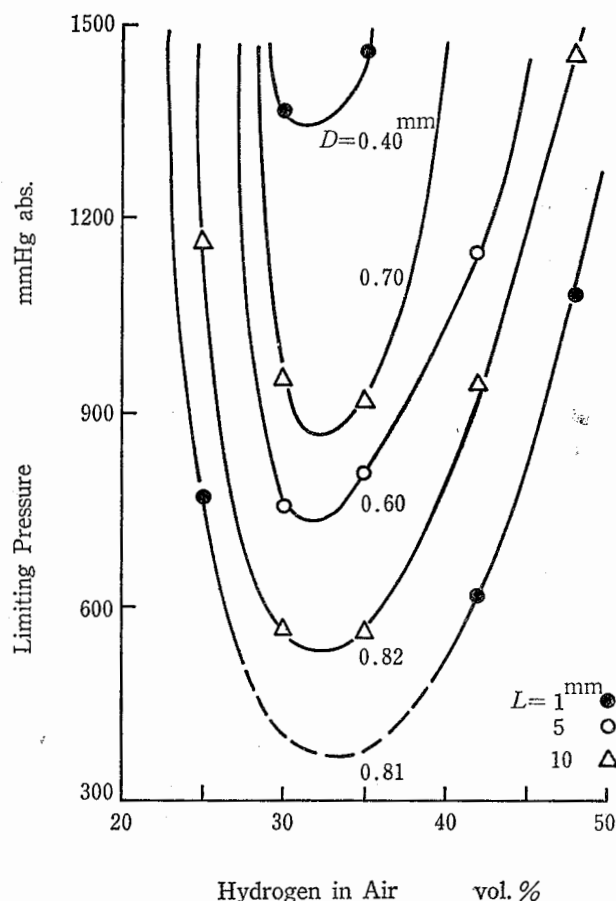


Fig. 6 Limiting pressures for quenching of hydrogen-air flames with variations of diameter (D) and length (L) of a hole in brass plate

水素濃度が消炎限界に及ぼす影響

Fig. 6 は、混合ガスの濃度が消炎に及ぼす影響を示す例である。 L 及び D が一定の場合について濃度と限界圧力の関係を示したものは、メタンの場合も水素と同様に当量濃度付近において最小値をとる曲線となるが、こうした傾向は火炎の挙動についての従来の知見から予測されるところと同じである。

図から明らかなように、消炎挙動に及ぼすガス濃度の影響は著しいが、このことは、当量値から離れた濃度においては L 又は D の微少な変化によって細隙の消炎挙動が大きく異なることを意味する^{*7}。従って、そのような燃焼限界に比較的近い濃度についての実験結果からは、論議の展開に必要な充分なデータが得られなかった。また一方、当量濃度付近での消炎が最も困難であることを考慮すれば、火災防止器の設計を前提とした実用上の観点からも、当量濃度付近での消炎挙動が解明されれば本報の目的は達せられると考えてよい。これらのことから、以下の論議は当量値付近のガス濃度についてすすめることとする。

5. 考 察

本章では、一定の条件下で生じた火炎を消炎させるのに必要な L と D の関係及び、その関係がガスの種類によってどう変わるかについて論ずる。ガス濃度は当量値付近を考えるが、この濃度はまた、先に述べた消炎径 (の最小値) を与える濃度でもあるので、結果としては、密閉系における消炎限界径と大気圧下における消炎径との関係を論ずることにもなる。

5.1 細隙による消炎の一般的挙動

Fig. 7 は、4.2 節で述べた方法によって、消炎限界圧力が 760 mmHg のときの L と D の関係をメタンの場合について示したものである。実験方法の相違がその理由であると考えられるが、真鍮板 ($L \leq 10$) とガラス管 ($L \geq 25$) の結果はひとつの曲線上には乗らないとみられるので、両者の間は破線で示した。 $L \leq 10$ においては曲線は放物線であるとみなすことができ、図の場合には次式が近似式の例である。 D と L のこの関係は、後述するように直線で近似させたほうが他のガスとの比較がし

$$D = 0.003 L^2 + 1.55$$

やすいが、いずれにせよ、図からもわかるように (仮想

^{*7} 例えば L を一定として D を変化させる場合、ある D に対する限界圧力は大気圧よりも相当低くなるが、それより僅かに小さい D では限界圧力が 1500 mmHg を超えてしまうということがある。

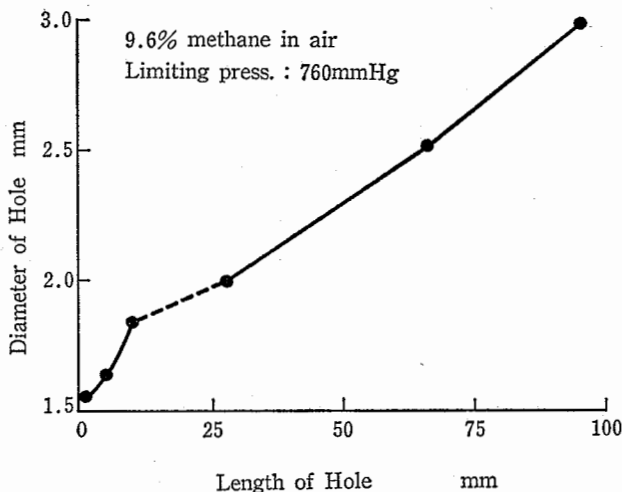


Fig. 7 Relation between diameter and length of hole for quenching
消炎限界における細孔の直径と長さの関係

上の) $L=0$ に対して D がゼロになるとは考え難いことに注目したい。

$L \geq 25$ の範囲では、 L と D はほぼ直線関係にあるとみられる。しかし、 L による D の増加は $L \leq 10$ の場合に比して小さいことは明らかであり、また、 $L > 100$ においては L による D の増加率は更に減少することが容易に推測される。図には現われていないが、 $D=3.5$ 、 $L=100$ のときの限界圧力は 760 mmHg より低いという結果を考慮すると、図の $L > 100$ の範囲における直線の延長は D が 3.0 と 3.5 の間において横軸に平行な直線となるはずである。つまり、 D がある値を超えれば L をいくら増しても消炎されない限界が存在するが、その限界の D は大気圧下の消炎径よりも小さくなることに留意したい。

これらの結果と第 2 章における考察とを考え併わせると、消炎に必要な L と D の間に何らかの関係があるとしても、それは、ある値以下の範囲の L (又は D) についてしか成立せず、かつ、その関係は L が大きいほど L の増加による D の増加が小さくなる (換言すれば、消炎に及ぼす L の効果は D の増加につれて小さくなる) というものでなければならない。こうした関係が成立する限界の L は、メタンについては 100 mm 以上であるが、水素においては、前述したように $L=25 \sim 100$ の範囲では L と限界圧力の間に規則性がみられなかったことから、消炎のために 25 mm 以上の L を必要とするような D については限界の L は 25 mm 以下であると考えられる。

こうした論議を実用上の火災防止器の設計にまで拡張してみると、 L を増せば D が大きくても消炎するとい

う関係が成立する上限に近い L によって消炎させようとする考え方は、 L (又はそれに対応する D) に対して同じ安全率を乗じて設計値を算出する場合には、 L (又は D) の小さい範囲についてのデータを基にした設計よりも危険度が大きいといえる。もっと単純に表現すれば、細隙の長さを大きくすることによって消炎効果を期待することは (特に水素のような燃焼速度の大きいガスに関しては) 好ましくない。このことは円孔以外の細隙についても同様であることが次の例からわかる：金網による水素-空気炎の消炎に関する実験⁴⁾によれば、消炎限界圧力は金網枚数 (本報でいう L に相当する) とともに増加するが、ある枚数以上では限界圧力が一定となる (枚数を増す効果が失われる) ような限界の枚数が存在する。この限界が金網の目開き (本報でいう D に相当する) によって異なることはいうまでもない。従って、このような場合には、枚数と限界圧力が何らかの比例関係にある範囲内でしか消炎効果を期待することができない。

以上の論議から、実験に使用した 3 種類のガスについて共通の考え方が適用できるのは、消炎に必要な L (又は D) が小さい範囲についてであると結論される。消炎に必要な D はガスの種類によって異なるが、実験結果によれば真鍮板を用いた場合が上記の条件を満たすと考えられるので、 $L \leq 10$ の場合について以下に論ずる^{*)}。

5.2 実験式 (消炎径との関係)

Fig. 7 においては $L \leq 10$ の範囲を 2 次曲線で近似したが、これを直線で近似しても D の実測値との差は 0.02 mm 以下であり、また、直観的な理解も容易であるので、 L と D の関係を直線で近似させることとする。Fig. 8 は 3 種類のガスについて近似式を比較したものである。(図は限界圧力が 760 mmHg の場合であるが、限界圧力が例えば 500 又は 1,000 mmHg の場合について近似式を求めると、 $L=0$ のときの D の値は当然それぞれ異なるが、直線の傾き自体は図の各直線とほぼ等しい。)

当量値付近の他のガス濃度については次の近似式が導かれる (限界圧力は 760 mmHg) :

$$D = 0.029 L + 1.51 \quad (8.5\% \text{ メタン-空気})$$

$$D = 0.028 L + 0.46 \quad (35\% \text{ 水素-空気})$$

この 2 式及び Fig. 8 の各近似式を比較すると明らかな

^{*)} 先に考察したように、 L がゼロに近いほうが消炎挙動の本質を理解するのに適するのではないかという考え方は、やはり妥当であったように思える。

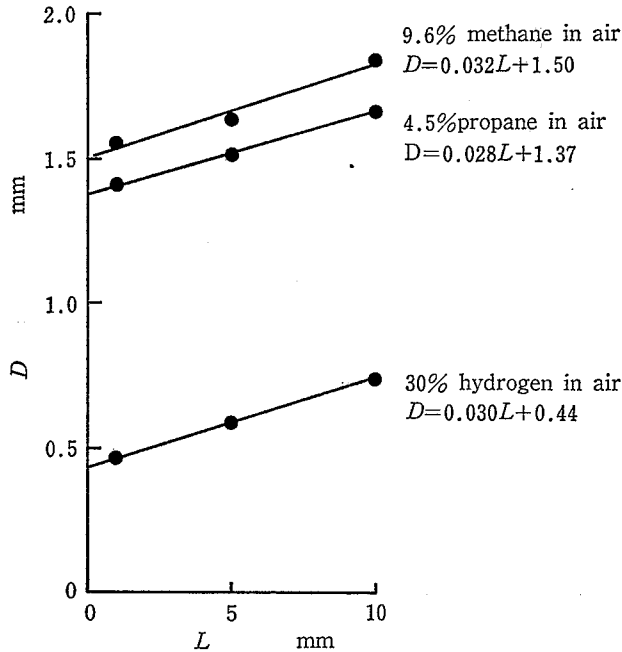


Fig. 8 Relation between diameter (D) and length (L) of hole for quenching by brass plate (Limiting press : 760mmHg)
真鍮板による消炎における細孔の直径と長さの関係

ように、当量値付近の濃度においては L の係数はガスの種類によらない一定値とみなすことができる。また、定数項は、同じガスについてはほぼ等しい値であることがわかる。 L の係数を例えば 0.03 としたときの D の計算値と実測値との差は最大約 2% (絶対値では 0.04 mm) であるので、3 種類のガスについて D と L の関係を次の一般式で示しても大きな間違いはない：

$$D = 0.03L + D_0 \quad (D_0 \text{ はガスによって異なる})$$

L の係数がガスの種類によらない一定値であるとみなす理論的根拠はない。しかし、この係数は Fig. 4 における各ガスについての 3 本の曲線の間隔に相当する値であることを考えると、ガスの種類によって曲線の変化率及び横軸方向の位置関係が異なるとしても、3 本の曲線の間隔が極端に変化することはないように思える。

一方、上式の定数項 D_0 は Fig. 8 の各直線の式において $L=0$ としたときの D の値であるが、この D_0 が消炎径と関連性を有するであろうことは容易に推測される。Fig. 9 は、それぞれのガスについて、 D_0 と、Fig. 3 に示した消炎径の最小値 (D_q) の関係を示したものである。図の 3 点は直線で近似させることができそうであるが、最適直線の式は定数項を含むものとなる。しかし、物理的意味からすれば $D_q=0$ のときには $D_0=0$ となるべきであると考えられるので、この条件を加味して

近似式を求めれば次のようになる：

$$D_0 = 0.44 D_q$$

Fig. 9 にはまた、「火炎防止器の設計に際しては、細隙の大きさは消炎径の $1/2$ 以下とすべし」という経験則に対応する関係を破線で示した。ふたつの直線の差は、この経験則がかなり妥当性の高いものであることを示しているが、消炎径に $1/2$ という係数を乗じただけでは消炎できない場合があることも意味している。図の結果から言えば、火炎防止器に使用する細隙の大きさは消炎径の 0.4 倍以下とすることが奨められる。

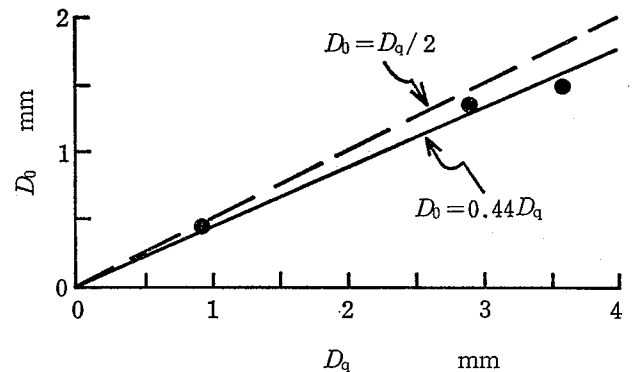


Fig. 9 Relation between quenching diameter (D_q) and D_0 : D_0 is calculated from each equation in Fig. 8 by substituting zero for L
消炎径と D_0 の関係 (D_0 は Fig. 8 の式において $L=0$ としたときの D の値)

以上の結果をまとめれば、 L が小さい (10 mm 以下) 範囲では、当量濃度付近の混合ガスの火炎の消炎に必要な D と L の関係が次式で示されることになる：

$$D = 0.03L + 0.44 D_q \quad (D_q \text{ は混合ガスの消炎径})$$

なお、円筒はめ合部に生ずる細隙 (diametral clearance) における水素-空気炎の消炎に関する実験⁵⁾ によれば、細隙の大きさ (はめ合う二つの円筒の直径差) とはめ合部の長さとの関係は、本報の結果と同様に直線関係となることが示されている。このほかには、本報の結果と比較できるデータは得られていないようである。

5.3 ガスの種類の影響

前節に示したように、消炎に必要な L と D の関係は消炎径から予測できると考えられるが、前節で導いた関係式を見ただけではガスの種類による消炎挙動の差を相対的に比較するのに充分ではない。Fig. 10 は、消炎に必要な L と D の組合せの実測値をもとに、 D と L/D の関係を示したものである。 D による L/D の増加は、水素の場合は他のガスに比して特に著しく、メタンとプロパンでは前者のほうが曲線の変化がややゆるやかであ

る。これらの曲線は、消炎に必要な L が D によって異なることを明確に示すと同時に、実用上は、火災防止器の細隙の L を D に応じてどのように設計すればよいかについての目安を与えるものとして有用である。

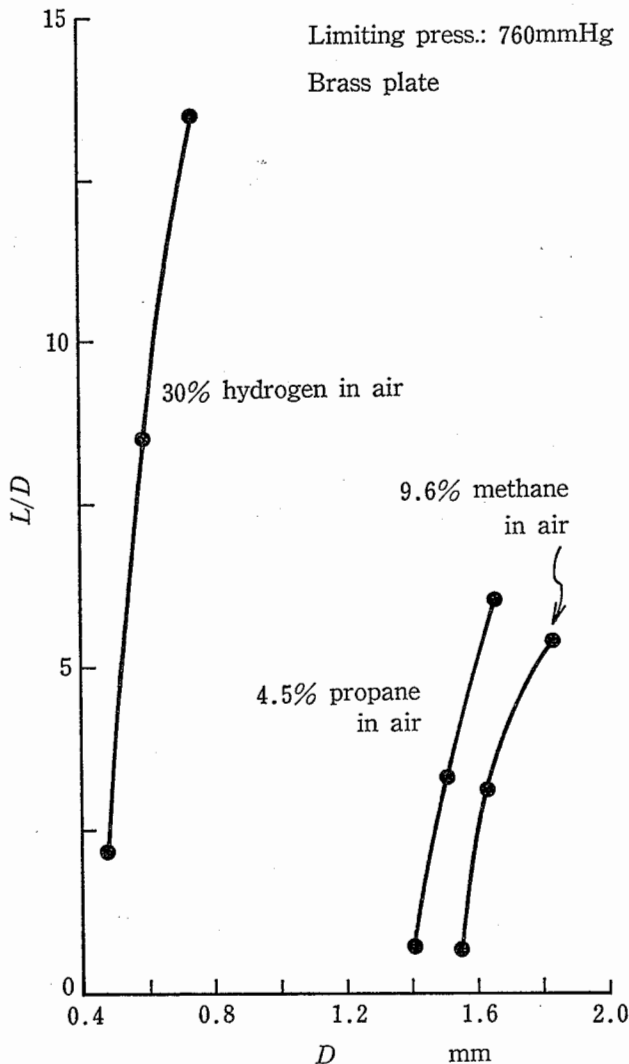


Fig. 10 Effect of hole diameter on the ratio of hole length to hole diameter
細孔の直径と(細孔の長さ)/(直径)の関係

5.3 Palmer の実験式との関係

消炎に必要な L と D の関係についての有用な説として知られている Palmer の実験式には、先に考察したように、 L 又は D の小さい範囲においては実際の現象と合致しない点がある。(ただし $L/D^2 = \text{一定}$ という関係における L と D のべき数については、理論的に妥当性があるとされている。)

ここでは、本報の実験結果と Palmer の実験式との差が實際上どのような意味をもつかを考察する。ただし、対象とする細隙が異なり、また、消炎の尺度が火災速度

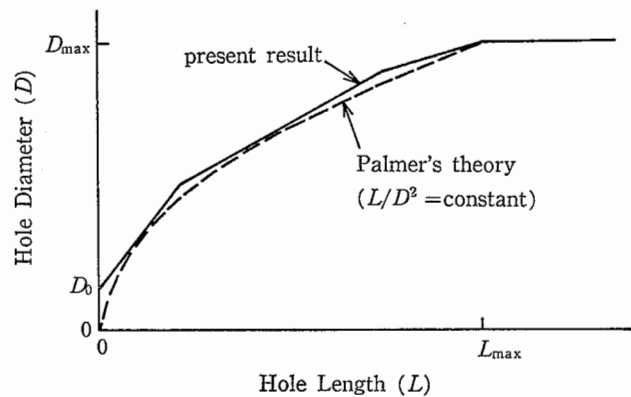


Fig. 11 Relation between diameter and length of a hole for flame quenching (explanatory drawing on arbitrary-scale axes)
消炎に要する細孔の直径と長さの一般的関係を示す説明図(座標軸は任意)

と限界圧力というふうに異なるので、具体的な数値について比較するのではないことを断っておく。

Fig. 11 は、両者の考え方から導かれる L と D の関係を、互いに一致するように任意の座標軸を用いて示したものである。比較を容易にするため、本報での論議の結果は数本の直線に分けて示したが、実際には1個の変曲点を持った曲線として示するのが適当である(この曲線は、 $L=0$ のとき $D=D_0$ となり、 $L \geq L_{\max}$ では $D=D_{\max} = \text{一定}$ となることに注意)。Palmer の2次式は、 $L=0$ において $D=0$ となる破線で示される。(なお、ここでは単に L と D の一般的関係を論ずるのが目的であり、従って、2次式の係数や直線の傾きは適当に選んである。)

図から明らかなように、 L がある値以上においては二つの曲線が同じ形状を描くことが考えられ、この領域においては両曲線の基礎となる考え方は同じ意味を持つことになり、このような領域においては Palmer の実験式は消炎現象を説明するものとして妥当性を有する。しかし、このような領域では、 L による D の変化率は(L がゼロに近い場合に比して)小さいので、 L と D が直線関係にあるとみなしても実際上大きな誤まりはない。

一方、 L が小さい場合には破線の関係が成立しないことは既に示したとおりであるが、例えば火災防止器の設計という実用上の観点からみれば、破線の利用するほうが安全側の結果をもたらすであろう。その理由は次のとおりである：Fig. 11 では、比較を容易にするために両曲線は接するように描いてあるが、もし両者が交わるとしても、 $D_0 > 0$ であるから、その交点よりもゼロに近い範囲では、実線は常に破線の上方にあるはずである。このことは、ある D に対しては破線で与えられる

L のほうが実線の式による L よりも大きいことを意味しており、 D が同じであれば L が大きいほど消炎が容易であることは、いまさら繰り返し述べるまでもない。

以上のことから、もし Palmer の実験式が（その係数までを含めて）ある範囲の L について正しく現象を説明しているものであるとすれば、 L がゼロに近い範囲については実験的事実に合致しないにしても、この実験式を実際に適用することには問題はないように思える。

6. 結 言

細隙における消炎を支配する二つの因子（細隙の大きさ D と長さ L ）の関係を明らかにするため、単一円孔を有する真鍮板とガラス管により消炎される限界条件について実験し、代表的な 3 種類の可燃性ガス-空気混合物の火炎の消炎挙動を説明する考え方を提示した。

実験方法としては、二つの密閉容器の間に真鍮板又はガラス管を取付け、一方の容器中で生じた爆発火炎が他方に伝播しない限界の混合ガス初圧（消炎限界圧力）を求めた。実験は水素、メタン又はプロパンと空気との混合ガスについて行ったが、消炎限界圧力を一定としたときの D と L の関係は、 L が小さい範囲においては、簡単な一次式で近似できることがわかった。この関係式は、当量濃度付近の混合ガスについては、いわゆる消炎径のみを助変数とするほかはガスの種類に無関係に成立するものと考えられる。

また、実用上の火災防止器の設計根拠としての利用を考慮して、従来この分野での通説となっている Palmer

の実験式との関係についても考察した。更に、消炎径の $1/2$ 以下の大きさの細隙となるように火災防止器を設計すればよいという従来の経験則に検討を加え、安全上は消炎径の 40% 以下の細隙とすべきであることを示唆した。

本報の結果は、消炎限界圧力を尺度とした論議に基づくものであるため、細隙の両側の空間の形状・寸法や細隙の数などの影響を考慮してはじめて一般化されるものであるが、消炎現象を利用した火災防止器の設計根拠について十分な知識が得られていない現状においては、本報の結果は実用上の目安としても有効に利用できると考える。（昭 57.8.1 受付）

参 考 文 献

- 1) Palmer, K. N., *Proceedings of the Symposium on Chemical Process Hazards with Special Reference to Plant Design*, pp. 51-57, The Institution of Chemical Engineers, London (1960): 難波ら訳“化学プロセスの災害防止 1”, pp. 109-124, 共立出版 (昭和 42 年)
- 2) Wilson, R. P., Jr., and Flessner, M. F., *Loss Prevention*, Vol. 12, pp. 86-95 (1979)
- 3) Potter, A. E., Jr., “Flame Quenching”, *Progress in Combustion Science and Technology*, Vol. 1 (edited by Ducarme, J. et al.), pp. 145-181, Pergamon Press (1960)
- 4) 林, 産業安全研究所研究報告 RR-24-5 (1976)
- 5) 林, 鶴見, 同上 RR-22-1 (1973)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-31-1

昭和 58 年 2 月 10 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 536.46 : 614.839

細隙における消炎現象に関する研究

——細隙の大きさと長さが消炎に及ぼす影響——

林 年 宏

産業安全研究所研究報告

RIIS-RR-13-1, 1~13 (1983)

細隙における消炎現象を利用した火炎防止器の設計に際しては、細隙の大きさ (D) と長さ (L) をどのように選択するかが極めて重要であるが、消炎が生ずる限界の細隙寸法についての知識は必ずしも充分ではない。この報告では、最も単純な形状の細隙である円孔を対象として、密閉容器中で生じた爆発火炎を消炎するのに必要な L と D の関係をしらべた。混合ガスの初圧が高いほど消炎しにくいという事実をもとに、消炎する限界の初圧を尺度として実験した結果、メタン、水素あるいはプロパンと空気との混合ガスの濃度が当量値に近く、かつ、 L が小さい場合には、 $D=0.03L+0.44D_g$ (D_g は消炎径) という関係が、ガスの種類に無関係に成立することがわかった。また、この結果をもとに、消炎に関する Palmer の実験式の妥当性についても考察した。(図 11, 参 5)

UDC 536.46 : 614.839

Experimental Study on Flame Quenching by Narrow Holes

—Effect of Hole Diameter and Length of Flame Path on Flame Quenching—

by T. Hayashi

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety

RIIS-RR-13-1, 1~13 (1983)

Flame quenching limits in narrow holes are studied for mixtures with air of methane, hydrogen or propane. Brass plates with a single hole and glass tubes are tested to determine any relations between hole diameter and length of flame path. A hole under test is connected between an explosion chamber and a detection chamber, and then observations are made whether flames originated in the former chamber pass through the hole into the latter. Through determination of limiting pressures, below which no flame transmission occurs through the hole, the hole diameter and the length of flame path are approximately interrelated by simple linear equations, which stands for all gases tested. Those results may be found effective in designing flame arresters. (11 figures and 5 references)