

Mar. 1980

RIIS-RR-28-1

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-28-1

消炎容積に関する研究

林 年 宏

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

消炎容積に関する研究

—管中の初期火炎の伝播限界について—

林 年 宏*

Quenching Limits of Initial Flames in Narrow Tubes —An Approach to the Study of Quenching Volume—

by T. HAYASHI*

When an electric spark is discharged in a volume filled with an explosive gas mixture, a spherical flame kernel is usually formed and subsequently stable flame develops throughout the mixture. In some cases, however, where the spark energy or other conditions are not satisfactory, the subsequent flame propagation does not occur even if a flame kernel has been observed. There exists a critical volume of initial flame for the propagation of subsequent flame, and if a flame kernel could not expand beyond the critical volume, the flame quenches. This critical volume is called "quenching volume",

In this report, quenching limits of initial flame are studied in narrow tubes with an attempt to measure quenching volume of explosive gas mixture instead of optical observations of freely expanding flame. Methane-air mixture is ignited by an electric spark of known energy at the closed end of a short narrow tube, which is connected to a larger chamber. Glass tubes with inner diameter of 6-20mm are mainly used for the experiments. For a given tube, a hemi-spherical incipient flame is once formed but is soon diminished without further propagation through the tube if the pressure of the mixture is marginal. For higher pressures, flame propagates through the tube, and for lower pressures no flame kernel is observed. Critical pressures are usually below atmospheric for tubes under test and decreased for larger tubes.

The relation between such critical pressure, referred as Limiting Pressure, and tube diameter is extrapolated so as to obtain a critical diameter for atmospheric pressure. This critical diameter is not the so called "quenching diameter" of the mixture, but is considered as "quenching diameter for initial flame", which may correspond to quenching volume of the flame of atmospheric pressure. The critical diameter for stoichiometric methane-air mixture is estimated to be 5.4mm by this study, whereas the values of quenching diameter have been reported as 3.33-3.38mm. This means that methane-air flame never originates in a tube whose diameter is smaller than 5.4mm and that tube diameter must be smaller than 3.3mm for the quenching of propagating flame through methane-air mixture. The critical diameter by this report shows fairly good agreement with "critical radius" obtained by Arnold and Sherburne in the study of freely expanding flame on the burner tip.

Effects of length and material of tube, of fuel content of the mixture and of spark energy on quenching of initial flame are also discussed. Furthermore, quenching behaviors of fast burning hydrogen-air flames are compared to those of flames of methane-air mixtures.

* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

1. 緒 言

爆発性混合ガスを満した空間内において電気火花をとばした場合に、混合ガスに着火し、かつ空間内全体に火炎が広がるためには三つの条件が満足されなければならない。その第一は、火炎伝播のもとになる火炎核 (flame kernel) が形成されるに十分なエネルギーが与えられることである。これは最小着火エネルギーとして知られている。第二の条件は、火炎核がある大きさ以上に成長できることである。これは混合ガスの組成や圧力に主に依存するが、火炎核から生じた反応熱がこれに接する混合ガス層の着火に充分でなければ、たとえ火炎核が生じてもそれ以上は伝播しない。すなわち、安定な火炎伝播が生ずるためには、ある最小の大きさにまで成長した火炎核 (これを初期火炎, initial flame と呼ぼう) が必要である。このような限界の火炎の大きさを消炎容積 (quenching volume) と呼ぶ¹⁾。火炎伝播の第三の条件は、空間内に火炎伝播を妨げる障害物の存在しないことである。ここで言う障害物とは熱的な意味での障害物、すなわち heat sink のことであって、具体的な例としては火炎が伝播し得ないような細隙を挙げることができるが、これは平行平板間消炎距離^{*1}や消炎径 (quenching diameter) で代表される。防爆電気機器のセーフ・ギャップや固体細隙を利用したフレーム・アレスタはその実用上の例である。

最小着火エネルギーについては多くの測定データがあり、固体細隙における消炎現象もよく研究されているが、この中間に位置する現象とみられる消炎容積 (これは、最小点火容積²⁾, minimum flame diameter³⁾ あるいは critical radius⁴⁾ と同じ概念と考えられる) については未だ余り知られていない。消炎径よりも大きい径の管中において、最小着火エネルギーよりも充分大きいエネルギーの電気火花を与えても混合ガスに (見かけ上) 着火しないという事実は、消炎容積のひとつの例と考えられる。また、電気火花を生ずる部分を消炎容積より小さい空間内に閉じこめてしまえば、ほかに特別の防護をしなくても着火源の安全化をはかることができるという可能性があり、安全上の利用価

値も期待される。

この報告では、消炎容積という現象に対するひとつのアプローチとして、管中における初期火炎の伝播限界条件 (管径、圧力、火花エネルギーなど) を、主としてメタン-空気混合ガスについてしらべ、成長した火炎が伝播しうる限界の管径である消炎径との関係を論じた。

2. 消炎容積の存在および消炎径との関係

爆発限界内の組成の混合ガスで満された、火炎が自由に拡がり得る空間を考え、この空間内で火花放電を起させたとすれば、放電のエネルギーがある限界以上であれば火炎核を生ずる。火炎核は、ある場合には初期火炎を経て安定な火炎へと成長し混合ガス中を無限に伝播するが、ある場合にはこれらの過程の途中において消滅、すなわち消炎する。火炎核が安定な火炎に成長するか否かは放電エネルギーの大きさと、混合ガスの燃焼反応によって生ずるエネルギーとによって決まる。

初期火炎が形成される前後における火炎の形状は球形とみなすことができるが、いまこの火炎面の半径が r から $r + \Delta r$ に僅かだけ増加したとすれば、火炎の表面積の増加率は $2\Delta r/r$ と近似できる。従って増加率は、 r が大きければ無視できるが、 r が小さい間は極めて大きいことになる。火炎伝播が持続するためには、火炎面それ自体が安定に保持されると同時に、火炎面に隣接する混合ガス球面に対して燃焼反応を生ぜしめるに十分なエネルギーを与える必要がある。火炎面の厚さは一定として、火炎面単位面積あたり放出される反応エネルギーは r に無関係であると仮定すると、 r が小さい範囲では火炎面積が小さく、従って放出される全エネルギー量が少いにもかかわらず、火炎面積の増加率が大きいため、次の火炎面を生ぜしめるために必要なエネルギー量がまかないきれないという状態が生じ得る。このような場合には火炎は消炎する。火炎核は、初期火炎よりも更に r が小さい状態であるから、反応により生ずるエネルギーは僅かであり、その反面火炎面積の増加率は極めて大きい。それにもかかわらず火炎が成長するためには、放電エネルギーのほうで不足分をカバーしなければならないことになる。一方 r が大きくなれば、火炎の表面積は次第に増

*1 電極間消炎距離という概念があるが、これは火炎核を生じない限界条件と考えたほうが理解しやすく、消炎容積とは明らかに異なる。

すのに反して表面積の増加率は小さくなるので、次の火炎面が形成されるためのエネルギー量が不足することではなく、かくて火炎伝播は持続する。

このように、火炎伝播の初期においては、火炎核が生ずるか否かは放電エネルギーの大きさによって決まり、初期火炎への成長は放電エネルギーの大きさ^{*2}と混合ガスの組成によって、また、安定な火炎に移行するか否かは混合ガスの組成によって決まると考えられる。一般に用いられる「混合ガスに着火しない」という表現は、このような観点から見れば、放電エネルギーが不足で火炎核すら生じない場合、火炎核が生じても初期火炎へ移行するには至らない場合および、初期火炎が安定な火炎伝播へ成長し得ない場合の三者に分けられる。しかし、こうした分類は必ずしも火炎の r に対応して明確に区別されるものではなく、肉眼観察に基いて火炎の生じない場合と、直径数 mm の火炎が生ずるがそれ以上は成長しない場合とに分けるほうが実際的かもしれない。

初期火炎が安定な火炎に成長するための限界の火炎（球状）の大きさ（体積）である消炎容積は三次元的な表現である。これを、一端を閉じた直径 D の管の閉端で火花放電を起させるモデルに置きかえればどうか。初期火炎は軸方向へ凸の半球状で成長する。しかし、管径 D が小さいと、火炎面が上述のように隣接する混合ガスに十分なエネルギーを与え得る大きさにまで成長する以前に、火炎の一部は管壁に達してしまう。従って、そのあと短い距離は伝播するにしても火炎の大きさは D を越えることはなく、その間に順次伝えられて行くエネルギーは管壁への熱損失もあるので次第に減じ、遂には消炎すると考えられる。このような限界条件における管径は消炎容積と同じ意味をもつと解される。しかし実際には、火炎の成長は火炎が管壁に達する以前に管壁の存在の影響を受けるので、消炎限界の管径は自由空間における消炎容積の場合に比して幾らか大きくなると予測される。

次に、消炎現象の実用的指標として従来から用いられてきている消炎径は、既に安定に伝播している火炎（球状で近似すれば球の半径が十分に大きい）が突然に径の小さい管中へ伝播せざるを得なくなったときに、その管中で消炎するか否かの限界径を示すものである。通常は、火炎背後は大気中に開放され、火炎速度

は初期の uniform movement の速度である場合について定義される。このような条件下では、管の入口の混合ガスは既に成長している火炎から十分なエネルギーを与えられ、そこに生ずる火炎は安定な火炎である。この状態は、閉管の端部で着火され、それが安定な火炎に成長するか否かという前述の場合と全く異なる。管中を火炎が更に伝播しようとする過程において壁面が及ぼす影響が閉管端着火の場合と同程度であるとすれば、消炎径のほうが初期火炎の成長し得る限界の管径に比してかなり小さくなることが予測される。

この報告では、初期火炎の伝播限界径と、既に実験値が報告されている消炎径との関係についても言及する。

3. 実験装置および実験方法

実験装置のブロック図を Fig.1 に示す。電気火花を生ぜしめる放電回路は、直流電源 (30kV)、高抵抗、コンデンサおよび電極からなる。電源から抵抗を介してコンデンサに充電すると充電電圧は徐々に高まり、電極における絶縁破壊により放電する。放電を検出して電源との接続を断つことにより一回だけ放電を生ずるよう制御するほか、コンデンサ容量に応じて抵抗値を変え (100 M Ω ~ 2000 M Ω)、記録に適するように放電開始時間を調節する。放電時の電圧-時間曲線は、高圧プローブとシンクロスコープ (掃引速度 0.1 ~ 2 cm/sec) を用いて毎回写真撮影する。この結果と回路定数とから放電電圧 V を求め、計算式 $E = CV^2/2$ により放電エネルギーを算出する。放電電圧はコンデンサ容量、電極間距離、混合ガス初圧などの条件が同じでも必ずしも一定値とはならないので、このことを逆に利用して、例えば初圧を一定として何回か実験をくり返すことにより (同一のコンデンサを用いても) ある程度の範囲の放電エネルギーを得ることができる。コンデンサは市販のオイルコンデンサ、セラミックコンデンサ、紙コンデンサを単独または組合せて用い、その容量をユニバーサル・ブリッジ (1 KHz) により測定したのち実験に供した。

火炎伝播限界径を求めるための実験管 (材質はガラス、一部の試験では金属) の一端はプラスチック板で閉じ、これに電極を装着する^{*3}。他端は実験管に比し

*2 放電全エネルギーから火炎核を生ぜしめるに要するエネルギーを減じたもの

*3 電極は管径により異なるが、直径約 1 mm のニッケルメッキ線、先端は尖っている。

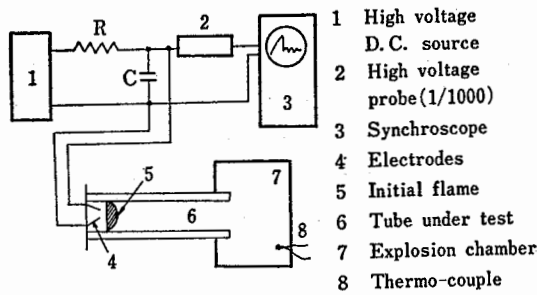


Fig.1 Schematic showing of experimental apparatus
実験装置

て充分大きな空間を有する爆発室に接続するが、これは実験管中を最後まで火炎が伝播したか途中で消炎したかを確認するためのもので、挿入された熱電対の出力から火炎伝播の有無を判定した。

実験管および爆発室の内部を真空としたのち予混合ガスを所望の圧力(初圧)まで満し、放電を起させる。混合ガスの初圧が高い、放電エネルギーが大きい、管径が大きいなどの条件下では爆発室にまで火炎が伝播する。これらの条件に欠けるときは初期火炎は生じない。この中間の限界の条件下では、初期火炎は生ずるが極く短時間存続するのみで消滅してしまうのが観察される。このような限界条件を確認するには初圧を数mmHg ずつ変化させるなど多大の時間を要するので、実験では初圧を変える最小単位は 25mmHg として爆発室内に火炎を生じない限界の初圧のみを求めた。このようにすれば、限界圧力より 25mmHg 高い圧力では火炎は管中で消滅しないこと、および、その圧力と限界圧力の中間の圧力では管の途中で消滅する初期火炎が生ずる管であることがわかり、この研究の目的としては充分である。そこで以下においては、爆発室に火炎を生じない場合を(放電エネルギーの不足により初期火炎にまで成長しなかった場合を含めて)単に「消炎した」と表現する。実験は種々の条件下において、同一の初圧で原則として9回くり返し、1回でも消炎しなかったときは更に初圧を下げるという方法をとった。なお、この実験では、ある場合にはその条件下での最小着火エネルギーを求めたことになるかもしれないが、こうした値を測定するための方法を持ってはいないので、エネルギー値は比較のための単なる尺度であることを付記する。

混合ガスは、市販ポンペ入りの可燃性ガスをそのままコンプレッサーからの空気と分圧方式により混合した

予混合ガスである。濃度は干渉計式ガス検定器により測定した。なお、初圧の最大値は 1500mmHg とした。

4. 記号

以下において用いる記号の意味は次のとおりとし、特に必要のない限りは註釈あるいは単位を付けずに用いることがある。

D: Inner diameter of tube under test (mm)

l: Length of tube under test (mm)

d: Distance between electrodes (mm)

L. P. (Limiting Pressure): Maximum initial pressure of gas mixture at which no explosion occurs in the explosion chamber.

It is not concerned whether an initial flame has been formed in the test tube or not (mmHg absolute, at 25mmHg increment) (消炎限界圧力)

E: Energy of electric discharge, calculated by $E=CV^2/2$ (mJ)

C: Capacity of condenser (pF, μ F, or F)

Open marks (○, □, △ etc.): Flame transmission through test tube into the explosion chamber.

Solid marks (●, ■, ▲ etc.): No explosion occurs in the explosion chamber, that is, flame quenches in a test tube.

(Note: Definition of open or solid marks are applied only to figures in which both types of marks are used.)

5. 実験結果および考察

5.1 消炎限界圧力および消炎限界径

放電エネルギーと混合ガスの初圧を変化させたときの管中での消炎の有無を Fig.2 に示す。ある容量のコンデンサについては、放電エネルギー E が同じならば初圧の高いほど、又、初圧が同じであれば E が大であるほど消炎しにくいことは予測されるとおりであるが、コンデンサの種類を無視して E と初圧だけについて消炎限界曲線を描いてみると、必ずしもなめらかな曲線とはならない。E の算出方法からすると、他の条

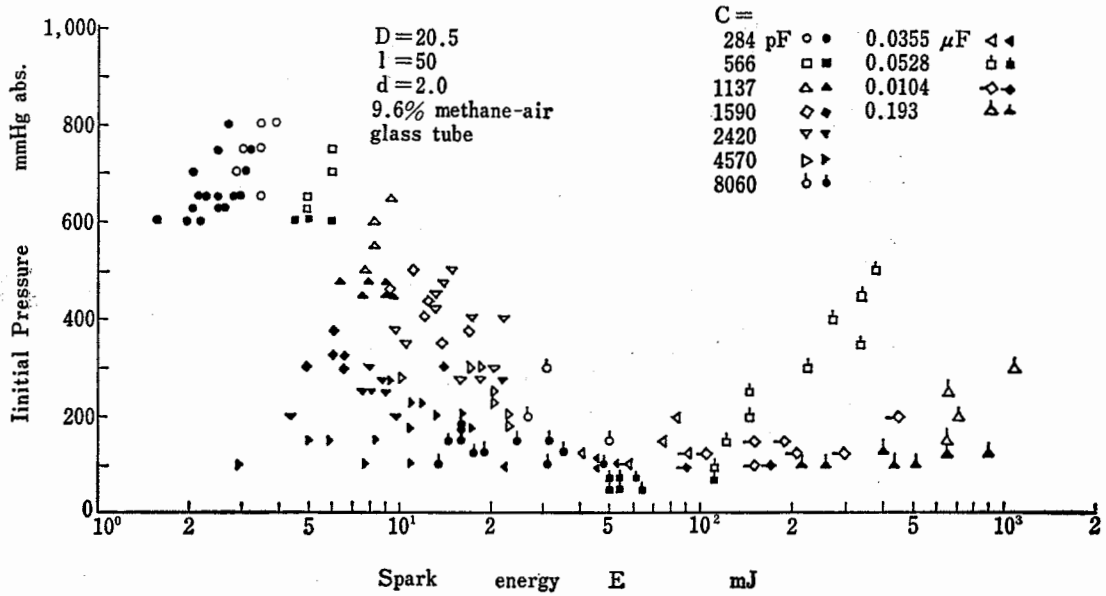


Fig. 2 Effects of spark energy and initial pressure on flame quenching in a tube
管中の初期火炎の消炎に及ぼす放電エネルギーおよび初圧の影響

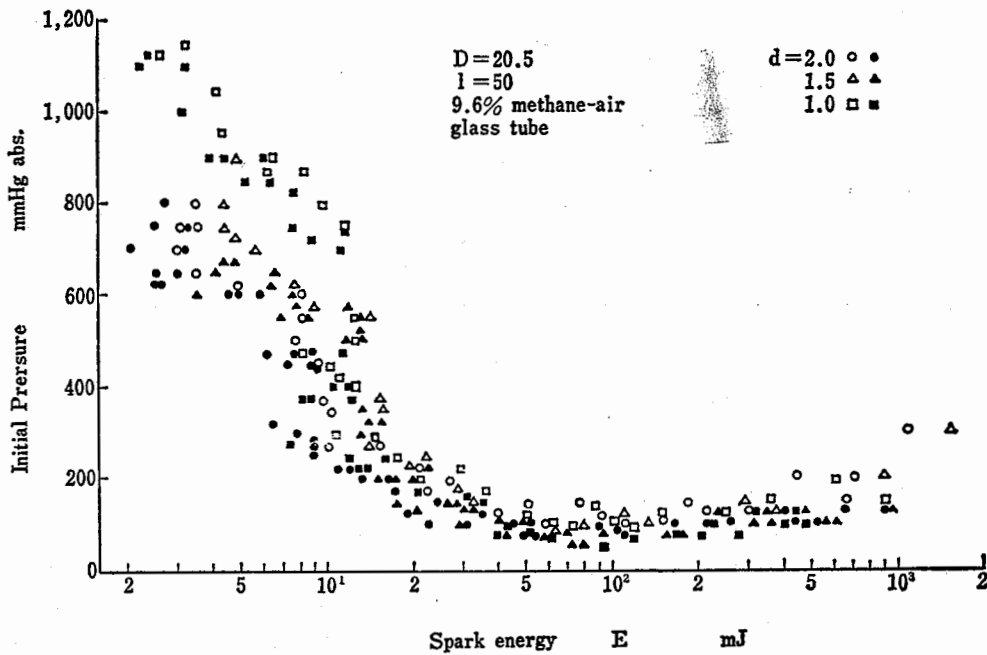


Fig. 3 Effect of distance between electrodes on flame quenching
電極間距離の影響

件が同じであればコンデンサ容量とともにEは増加するので、消炎限界曲線は右下りの単純な曲線となるはずである。予測と実験結果の相異の理由は恐らく、コンデンサの種類（材質、構造、容量、組合せなど）が異なると放電のモード（例えばエネルギー放出の時間的密度、あるいは時定数）が変わることにあると思わ

れる。Eが大であっても、エネルギー密度が小さかったり、着火に有効に働らく成分が少なければ着火源とはなり得ない。図では余り顕著ではないが、Eがある値を越すと限界圧力が増加し始める傾向があるが、これも同様の理由によると思われる。容量を一定とし、充電電圧を変えることによりEを変化させる方法で

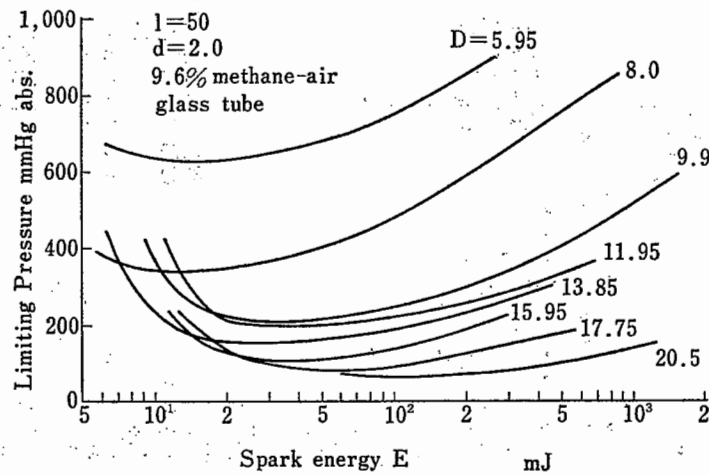


Fig.4 Limiting Pressures for glass tubes of various diameter
種々の管径における消炎限界圧力

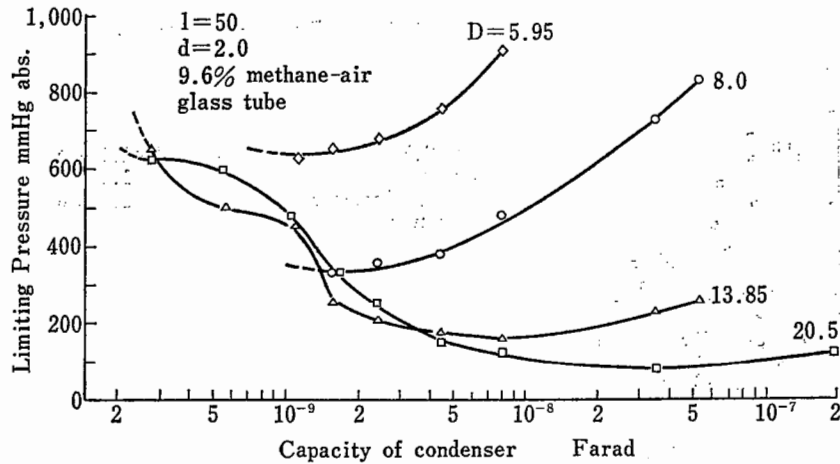


Fig.5 Effect of condenser capacity on Limiting Pressure
コンデンサ容量と消炎限界圧力の関係

は、こうした影響は少ないであろう。この実験では、スイッチングにより放電させる際の接点部でのエネルギー・ロスを無くするため自然放電を起させたが、それに伴いコンデンサ容量を変えねばならないという点には方法上改良の余地がある。

しかしながら、図からも明らかなように、消炎の生ずる初圧はあるEのところで最小値をとると考えられる。最小圧力を与えるEは管径によっても異なるが、これについては Fig.4 に示した。この最小圧力は、着火に最も適した放電エネルギーが与えられた場合においても消炎するという限界の圧力であるから、以下の論議においては消炎の特性値として利用する。

Fig.3 は、電極間距離を変えたときの消炎の有無を、

消炎する限界の圧力付近について示したものである。限界圧力の最小値の近傍では d の影響は殆んど見られない。既に知られているように、着火に及ぼす d の影響は E の大きさと関係するが、E が充分大きければ d が小さくても火炎核は生ずる筈であり、一方、従来の知見からすれば初期火炎の伝播限界径は 20mm よりは充分小さいと推定されるので、一旦火炎核が生ずればその後の挙動は d には無関係となるので図のような結果となる。

種々の管径について Fig.2 のようなデータを求め、各管径について消炎限界圧力を結んで曲線としたものを Fig.4 に示す*4。Fig.5 はコンデンサ容量と消炎限界圧力の関係を示すものである。D が 5.95 と 8.0 の

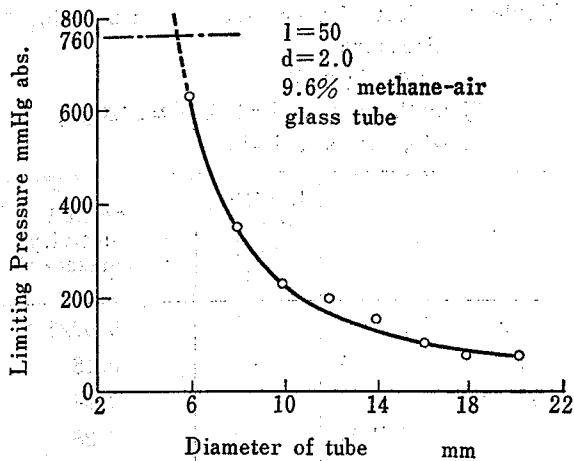


Fig. 6 Relation between tube diameter and Limiting Pressure
管径と消炎限界圧力の関係

曲線は、Cが更に減ると傾きの急な左上りの曲線になることが予測される。この結果は実験で得られた範囲のデータによるものであり、かつ、既に述べたように、あるコンデンサについては基本的には混合ガスの初圧の変化によってのみ放電エネルギーの大きさを変え得るという制約下でのデータに過ぎないが、消炎限界圧力の最小値を与えるのに最適なコンデンサの容量（あるいは種類）が存在することを示唆している。

着火源の安全化という観点からは、各管径について放電エネルギーと消炎限界圧力の関係が得られることが望ましいが、Fig. 4 から明らかなように、このような関係は（Eの大きい範囲を除けば）求まらない。従って、Fig. 4 の各曲線の最小値を消炎の指標とすることになろう。これらの最小値をもとに管径と消炎限界圧力の関係を示したのが Fig. 6 である。Dの増すにつれて L.P. の減ずることは予測されるとおりであるが、Dが 18mm を越えると L.P. は一定となることから、この混合ガスの着火限界（爆発限界）圧力は 75mmHg であるとみなせる。この図は、ある径の管中において初期火炎が消炎する限界の圧力を示すが、逆に見れば、混合ガスの初圧がある値のときの初期火炎の伝播限界径を知ることができる。この実験では最小管径は約 6 mm であるが^{*5}、図の曲線を外挿して L.P. が大気圧（760mmHg）となる点を求めると D=5.4 となり、この管径は初圧が大気圧のときの初期火炎が管中を伝播

*4 Eが数 mJ 以下の限界曲線は、図の煩雑さを避けるため略したが、いずれも左上りの曲線である。

*5 管端から電極を挿入する方法では、この程度の径が限度である。

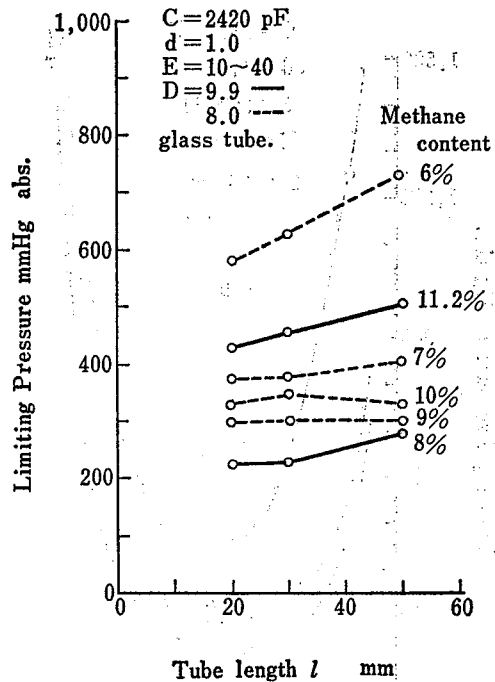


Fig. 7 Effect of length of tube on Limiting Pressure
管長の影響

し得ない限界である。すなわち、この混合ガスの圧力が大気圧のときには、これよりも大きい径の管中でなければ、（例え、火炎核あるいはそれに続いて初期火炎が生じたにしても）50mm 以上の距離にわたって火炎伝播は持続されないことになる。

管中の初期火炎の伝播限界径と消炎容積とが同意義であると断ずるには更に検討が必要であるが、バーナー上に形成されたメタン-空気の初期火炎についての光学的観察に基いた Arnold の報告⁴⁾によれば、火炎核が成長するか消滅するかの限界半径は約 2.31mm であり、前述の限界径とよく一致しており、初期火炎の消滅に関してはそれが自由空間内であろうと細管中であろうとほぼ同一とみなすことができそうである。なお、壁面の存在の影響については 5.3 において更に考察する。

5.2 管長およびメタン濃度の影響

管中を伝播する火炎の場合は火炎面から管壁への熱損失などがあるため、管径が充分大きくない限りは管の長さが消炎に影響し、その影響は管径の小さいほど著しい。Fig. 7 は、実験に用いたうちの径の小さいほうの管について管長 l の影響をしらべた結果である。

図によれば、l の影響はメタン濃度が当量値（約

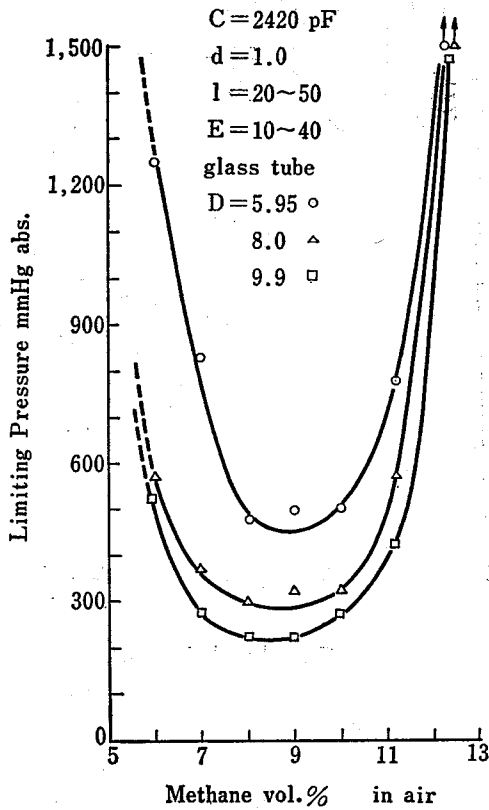


Fig. 8 Effect of fuel concentration on quenching of initial flame in tubes
メタン濃度と消炎限界圧力

9.5%) に近いところでは殆んど見られないが、当量濃度からはずれるにつれて火炎が弱くなるため次第に 1 の影響が現われてくる。しかし、この研究で対象としている初期火炎の消炎という観点からすれば、1 が管径と同程度の値までの範囲において 1 の影響を最も受けやすいとみられる。実験では 1 は 20~50mm としたが、これらの管長を伝播するまでには初期火炎は既に安定化してしまっているとみなすこともでき、その意味では、図は単に減圧下における消炎限界圧力と管長の関係を示したことになるかもしれない。いずれにせよ、火炎の伝播した距離が管の径を越えてしまったあとでは、消炎容積に相当する概念は存在しないことに留意したい。

Fig. 8 は、Fig. 7 に示したような一連の結果に基づき、メタン濃度と消炎限界圧力の関係を示したものである。濃度が当量値からはずれると放電エネルギーの僅かな差も影響し、1 の増すほど L.P. が増加するという結果は必ずしも得られなかったが、L.P. としては

Table 1 Effect of tube material on Limiting Pressure

管の材質の影響
9.6% methane-air, $d=1.0$, $C=2420 \text{ pF}$,
 $E=10 \sim 15$, $D=8.0$, $l=50$

Material	Limiting Press. mmHg abs.	Thermal conductivity cal/cm·sec·°C
Glass Pyrex	400	0.0026
Iron SS-34	400	0.18
Copper	400	0.94
Brass BsBM ₂	400	0.28
Gun metal	400	~0.12~
Aluminum 56 S	400	0.28
Poly vinyl chloride	375	0.17

実験した 1 について得られたうちの最も低い値をプロットした*6。図から明らかなように、当量値を中心とする 8~10% の範囲で L.P. は最小値をとり、これらの範囲からはずれるにつれて急速に消炎が容易になる。

5.3 管の材質の影響

内径が同一で材質の異なる種々の管について L.P. を求めた結果を **Table 1** に示す。管壁の消炎効果については多くの研究があり、未だ定説は得られていないようであるが、初期火炎の伝播については、表に示すとおり壁面の材質の影響はみられなかった。表には各材質について、消炎と最も関連の深い熱伝導率を示したが、このように材質の熱的特性が影響しないという結果は、壁面そのものが火炎を消滅させるというより、壁面近傍に消炎を支配する境界層 (boundary layer) が存在することを示唆している。すなわち、管壁に接して混合ガスの薄い層を考え、この混合ガス層は反応しない (火炎に侵されない) と仮定すれば、火炎から管壁への熱損失は実質的にはこの境界層への熱損失ということになり、管壁そのものの材質の熱伝導率などが直接には消炎に関与しないことが説明される。(しかしながら、このような境界層の存在を実験的に証明することは容易ではないと考えられる。筆者らは最も単純な方法として、密閉したガラス管中で当量濃度の混

*6 これらの曲線はコンデンサーが同じ場合についての比較のためのもので、それぞれの管径について最も低い限界圧力を与えるものではない。

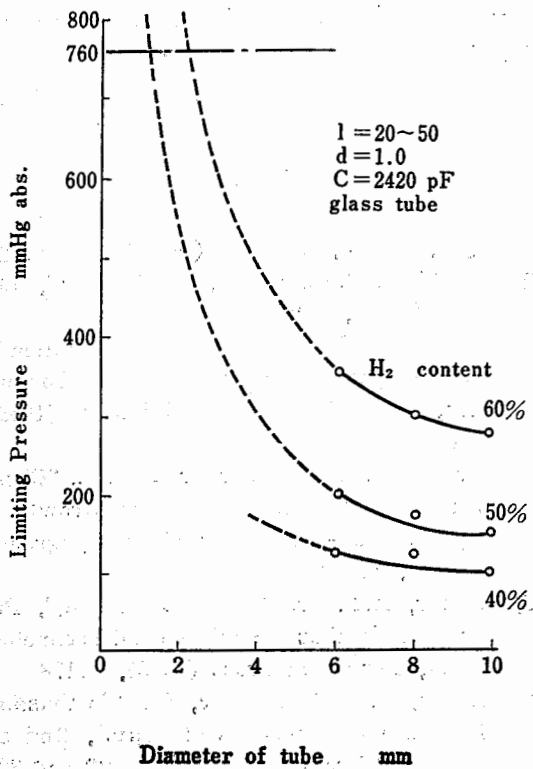


Fig.9 Relation between tuba diameter and Limiting Pressure (H₂-air) 管径と消炎限界圧力 (水素-空気)

合ガスを燃焼させ、反応後の残存メタン量から境界層の厚さを求めようとしたが、反応するメタンは完全燃焼するという前提に立ったため、この試みは失敗した。もしこのような境界層が存在するとすれば、5.1 では管の内径を消炎限界径としたが、真の限界径は管内径から境界層の厚さを減じたものとなる。しかし、安全の分野への応用という観点からは、この境界層の存在は管壁そのものに含めて考えてもよいであろう。

5.4 水素-空気混合ガスについての結果

混合ガスの燃焼速度は消炎と密接に関係する。前節までの実験に用いたメタンは可燃性ガス・蒸気のうちでは最も消炎されやすいものと考えられているが、これとの比較のために、最も消炎されにくいガスの代表である水素-空気混合ガスについても実験した。結果を Fig.9 に示す。水素 30% の結果は 40% の場合とほぼ同じであった。図の破線は、曲線の変化の仕方がメタンの場合と同様であると仮定したときの推定値である。水素-空気混合ガスの大気圧における燃焼速度は、水素 60% で 170cm/sec, 40% では 260cm/sec

であり、一方、メタン-空気については最大速度が 35 cm/sec (10% のとき) である⁹⁾。減圧下における測定値は見当たらないが、水素の場合の燃焼速度の方が小さくなるとは考え難いので、燃焼速度が消炎に影響する重要な因子であるとすれば、図の曲線は消炎限界径が最も大きくなるように描いたものである。実際には曲線の変化の仕方はもっとゆるやかであるとみなすのが妥当である。図の曲線から圧力が大気圧のときの管径、すなわち初期火炎の消炎限界径を求めてみると、水素 60% で約 2mm, 50% で約 1mm である。また、水素 40% については推定曲線を描くことも困難であるが、消炎限界径が 1mm 以下となることは確実であるように思える。このような推測に基けば、実験した水素濃度範囲においては、火花放電のエネルギーが火炎核を生ぜしめることに充分である場合には、火炎は途中で消滅することなく混合ガス全体に伝播すると思われるべきであることが結論される。

5.5 消炎径との関係

消炎容積と消炎径の関係については先に述べたとおりであり、初期火炎の消炎限界径のほうが消炎径より大きくなることが予測される。

Potter⁶⁾ は平行平板間消炎距離についてデータをまとめているが、これから求めた消炎径は当量濃度のメタン-空気混合ガスについて 3.33~3.38mm である。一方、本報で消炎容積とみなした初期火炎の消炎における限界径は約 5.4mm であり、消炎径のほうが約 1.5 倍大きいことになる。この比率は混合ガスの組成によって変わることが予測される。Potter のデータによれば水素-空気当量混合物の消炎径は 0.77~0.99 mm であり、本報で求めた消炎限界径は水素 50% でも約 1mm であるから当量濃度では更に小さくなると考えてよい。しかし、消炎容積の径は消炎径よりは小さくならないので、水素の場合にはこの両者はほぼ同じ値をとると結論される。このことは、初期火炎を生じさせないように空間の大きさを制限することと、伝播し始めた火炎を消炎させることは同程度の困難さを有することを意味する。従って、着火源としての放電火花を考えた場合には、水素については放電エネルギーを小さくする以外には、着火源としての危険性を排除する方策はないことになる。

6. 結 語

放電火花により生じた火炎核が安定な火炎に成長するための限界である消炎容積については従来あまり知られていないので、着火源の安全化としての利用を念頭において、消炎容積と消炎径の関係などについて検討した。

消炎容積は火炎の成長過程の光学的観察によって求められているが、本報では細管中における初期火炎の伝播限界径を求め、これが消炎容積の径に相当するとみなせることを示した。また、当量濃度のメタン-空気混合ガスの初期火炎の消炎限界径は約 5.4mm であって、消炎径の約 1.5 倍となることがわかった。しかし、水素-空気混合ガスのように燃焼速度の大きいガスについては、初期火炎の消炎限界径と消炎径はほぼ同じ値をとると推測された。

消炎容積を着火源の安全化に利用するという点では、空間の大きさが小さ過ぎるために、ごく特殊な分野を除いては期待しにくい。例えば放電火花のエネ

ルギー値の面から更に検討することは有用であると考えられる。

(昭和 55 年 1 月 21 日受理)

参考文献

- 1) 疋田, “爆発”, コロナ社 (昭和 40 年), p.62
- 2) Strehlow, R. A., 水谷訳, “基礎燃焼学”, 森北出版 (1973), p.215
- 3) Von Elbe, G., “The problem of ignition”, 4th Symposium (International) on Combustion, The Williams and Wilkins Co. (1953), p.13
- 4) Arnold, J. S. and Sherburne, R. K., “Observation of the Incipient Flame Growth in Hydrocarbon-Air Mixtures”, 4th Symposium (idem), p.139
- 5) Potter, A. E. Jr., “Flame Quenching”, Progress in Combustion Science and Technology Vol.1, Pergamon Press (1960), p.178
- 6) Lewis, B. and von Elbe, G., “Combustion, Flames and Explosions of Gases”, 2nd ed., Academic Press Inc. (1961) p.382 and 387

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-28-1

昭和 55 年 3 月 31 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 611.97:233/50/52

電気粘性流体制御形多関節人工指のバイラテラル制御
—制御要素としてのウインズロクラッチの動特性—

杉本 旭・近蔵太二・深谷 潔

産業安全研究所報告 RIIS-RR-28-6

本研究ではバイラテラル制御用マニピュレータの駆動装置として用いるウインズロクラッチの開発を行ない、その一般的特性を把握し、他の方式による既存のクラッチと比較検討を行なった。

その結果、ウインズロクラッチは、その持つ個々の特性については他の方式と比較してそれ程秀れているとは言えないが、制御システムの構成如何で改善が可能であり、しかも、形状が簡単なため、非常に小型となる。したがって、バイラテラル制御による多関節人工指のように、コンパクトな多自由度を要求する場合に非常に秀れていると言える。



UDC 611.97:62-233/50/52

Bilateral control of Artificial Fingers system driven by the electroviscous fluids

—Dynamic properties of the Electroviscous-Fluid Clutch (Winslow clutch) as an element of the control—

By Noboru Sugimoto, Taiji Rondo, Kiyoshi Fukaya

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-RR-28-6

In this study, Winslow clutches with the purpose of controlling the multi-finger system were developed and some general properties of them were examined and compared with other types.

In the results, the Winslow clutches, though could be said to be superior to other type with respect to rapid response stability, have as simple structure as disc, which makes driving unit of the system smaller and then capable of giving the system more degrees of freedom. Besides, in this study, the control system of induced force using the Winslow clutches were investigated. As the results, it was confirmed that the force was controllable with satisfactory response and small error.

(15 Fingers, 3 Tables, 3 Photographes, 3 References)

