NOV. 1973

RIIS-RR-22-1

UDC 614.838 : 536.46

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-22-1

水素-空気混合ガスの火炎逸走特性

——はめあい結合に対するセーフ・ギャップの推定——

林　　年　　宏

鶴　見　　平　三　郎

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

水素-空気混合ガスの火炎逸走特性

——はめあい結合に対するセーフ・ギャップの推定——

林　　年　　宏*
鶴　見　平　三　郎*

Flame Quenching of Hydrogen-Air Mixtures under Low and Reduced Pressures

——Estimation of Maximum Safe Gaps for Diametral Clearances——

by Toshihiro HAYASHI* and Heizabro TSURUMI*

Flame quenching in narrow gaps is not only interesting as one of the fundamental aspects of combustion but is an important technical background in considering safety practices such as flame arresters or flameproof enclosures of electrical apparatus for use in hazardous areas.

This report describes about the flame quenching abilities of various sizes of spigot joints. Experiments were carried out with stoichiometric hydrogen-air mixtures for three cylindrical enclosures. Each enclosure was consisted of ignition chamber and protected chamber, and these two chambers were connected through the gap of spigot joint. The internal volume of the ignition chamber was 100, 450 and 1920 cm^3 respectively. The gap width (diametral clearance) had a range from 0.1 to 0.4 and the gap length (length of flame path) were ranged between 0.5 and 25 mm.

After setting up the test enclosure for a specified combination of the gap width and length, the whole assembly was evacuated and then filled with premixed gas mixture up to a test pressure. The mixture was ignited in the center of the ignition chamber through a high voltage electrical discharge, and observation was made if any explosion occurred in the protected chamber. The highest initial gas pressure which gave at least five successive quenchings was defined as the Limiting Safe Pressure (L. S. P.) and used to compare the relative quenching ability of the gap.

Main results are as follows;

1) For a constant gap width W, the longer the gap length L is, the higher the L. S. P. became, and the rate of increase of the L. S. P. was larger for smaller W. The relation between the L. S. P. and L was computed to be nearly parabolic in so far as this study concerned.
2) For the gap width wider than 0.85 mm, it was estimated that any gap length could no longer quench the explosion flame if initial pressure exceeded 100 mmHg (abs.). This result could be compared with the reported values of quenching distance (0.5～0.64 mm) under atmospheric

* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

pressure.

3) For a constant L, the L. S. P. increased with the decrease of the gap width, and this trend was more distinctly observed for the width less than 0.2 mm.

4) The gap width which corresponded to the L. S. P. of 760 mmHg was considered to be Safe Gap. For 100 and 1920 cm^3 flameproof enclosures, Safe Gap estimated for $L=25$ mm was 0.23 and 0.18 mm respectively.

5) Safe Gaps increased linearly with the length of flame path in the range of this study, but this relation might be extrapolated up to $L=50$ mm on safe side.

1. 緒　　言

可燃性ガスの危険性を評価する尺度は幾つかあるが，当該ガスと空気との混合ガスの爆発火炎が一定条件下においてどの程度小さいスキを通過しうるかを比較の基準とし，爆発災害防止の技術に応用できる。

わが国においては，危険場所で使用される電気機器のうちの耐圧防爆構造の機器に対してこの考え方を適用しており，機器の外被をなす容器の接合部に許容されるスキの最大値とスキの奥行の最小値はガスの種類（爆発等級）に応じて3つに分類される。爆発等級1および2のガスに対してはスキの許容値が具体的に示されているが，爆発等級3のガス（水素，アセチレンなど）を対象とする容器の接合部のスキは，その容器で実際に爆発試験を行なって火炎逸走しない限界スキ（実験的セーフ・ギャップという）を求め，その1/2以下のスキで機器を設計することになっている[1]。爆発試験には特殊な設備・技術などを要するため，機器設計者側での実施は必ずしも容易ではなく，この種の機器の要求が十分に満されていないのが現状である*1。

国際的にはこの種の問題はIEC(International Electrotechnical Commission，国際電気標準会議）において標準化が進められており，最近の勧告[2]では水素を対象とする機器のスキの設計値をかなり具体化した。わが国も基本的にはこの勧告に賛成しているが，これらの数値の採用までにはさらに十分なデータの蓄積が要求されるであろう。

耐圧防爆構造の機器でスキの大きさと関連して重要なのは接合部の構造（スキのとり方）である。容器とその蓋の結合方式としては，フランジ結合（Flanged joints），はめあい結合（Spigot joints）およびねじ込結合（Threaded joints）が一般的である*2。フランジ結合については，締付ボルトの強度，間隔などの条件如何によっては容器内の爆発により接合部が瞬間的に開く（スキが設計値より大きくなる）ことが知られており，特にセーフ・ギャップの小さいガスに対しては安全性に及ぼす影響が大きい。ねじ込結合は精密なねじの加工および寸法測定に実用性に欠ける面がある。はめあい結合は特に爆発等級3のガスに対する接合部の構造として適しており，国際的にもこの方式を推奨する方向への動きがみられるようである。

本報ではこのような事情を背景として，3種類の大きさの異なる容器とその蓋の円筒はめあい部における火炎逸走特性を，水素-空気混合ガスについて，特に混合ガス圧力との関係で研究した。

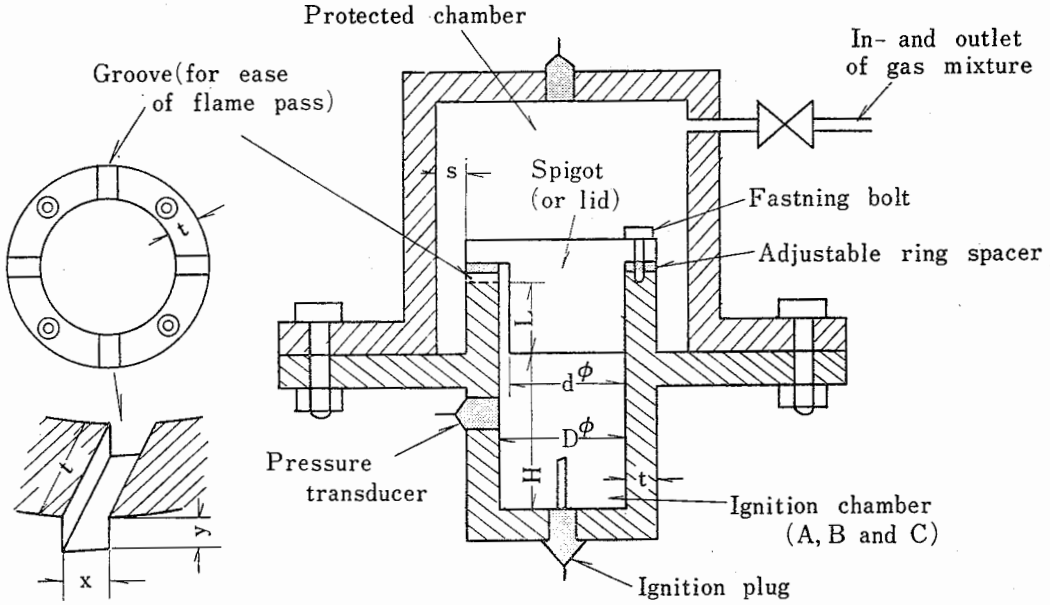

Fig.1 Schematic cross-section of test enclosure
実験容器の断面略図

*1 昭和45年10月1日から47年3月31日までの間に当所において新たに申請を受けて検定試験を行なったこの種の機器としては，水素を対象とする回転機類が9件あるにすぎない。

*2 これらの結合方式の名称は参考文献 1) および 2) によった。

接合部のスキとスキの奥行によって火炎逸走が阻止できるという事実は，細隙を有する固体中での火炎の消炎現象によるものであり，セーフ・ギャップは消炎距離のひとつの形にほかならない。一般にセーフ・ギャップは，混合ガスの初圧が大気圧のもとで，一定の容器についてスキの奥行を固定し，スキの大きさを変化させた時の火炎逸走の限界スキとして求められる。

筆者らはセーフ・ギャップを単に防爆電気機器の構造要件としてではなく，消炎現象の解明のひとつの手がかりとして捉えているので，実験上はスキの値は一定に保ち，混合ガスの初圧をかえて火炎逸走の限界圧力を求めた。この方法ではセーフ・ギャップそのものは一般には得られないが，種々の条件での実験結果からその推定値を求めることが可能であり，機器設計の基礎データとして十分利用価値があるものと信ずる。

2. 実　　験

2.1 実験容器の仕様とスキの寸法

実験容器（そのスケッチを **Fig.1** に示す）は点火側容器と引火側容器からなる。点火側容器は円筒状（この内径をDとする）で，これに外径dの円筒状外周を有する蓋（フランジ付）をM6ボルトで締め付ける。点火側容器と蓋のはめあい結合部には，奥行（はめあい部長さ）がL，大きさの最大がD-d（直径差）のスキが構成される。蓋とのフランジ接合面には，深さ3mm，幅 10mm の切欠きを数カ所もうけた。

スキの奥行L（以下，単にLということがある）はリング状のスペーサーをフランジ間にはさむことにより，またスキの大きさW（以下，単にWと示すことがある）はdの異なる蓋を用いることにより，それぞれある範囲内で可変できるようにした。

点火側容器は大きさの異なる3種類があり，以下これらを容器A，B，Cと称する。容器および蓋の寸法等を **Table 1** に示す。なお，材質は SS 41 で，火炎逸走に関連する面の仕上げの指定値は 18-S である。

引火側容器は配管用炭素鋼管（ガス管）にフランジを溶接し，点火側容器と接続できるように加工した。本報では平面フランジ接合面からの火炎逸走を対象としておらず，点火側容器から引火側容器中への火炎の噴出方向はスキの方向に対して直角であるゆえに，引火側容器内壁が噴出火炎に対する障害物となる度合は比較的小さいと考えられる。引火側容器の内径（称呼インチ数），長さ，および内壁と点火側容器の外周との距離 s は Table 1 のとおりである。

2.2 実験ガス

Table 1 Dimensions of test enclosures
実験容器の各部寸法

Ignition chamber										Protected chamber		s
Chamber	Inner Diameter D mm	Diametral clearance W(D-d) mm	Length of flame path L mm	Internal volume cm³*	Number of grooves and bolts	H/D*	x mm	y mm	t mm	Nominal pipe diameter inch	Length of chamber mm	mm
A	60	0.38 0.29 0.19 0.08	0.5～25	100	4	0.6	10	3	17	4	105	5
B	90	0.36 0.26 0.16 0.08	2～25	450	6	0.8	10	3	30	8	200	28
C	120	0.37 0.28 0.19 0.09	2～25	1920	6	1.4	10	3	30	8	200	13

*L=25

水素は市販ボンベ入りのものをそのまま用い，分圧方式により大気条件下の空気と混合して実験に供した。混合ガス（以下，単にガスということがある）中の水素濃度（vol.％で示す）は，干渉計式のガス濃度計（水素 0～100％ 用，有効室長 20mm）でチェックした。ガス濃度は，一部の実験で 10～50％ の間で変化させたほかは 31±1％ の定濃度とした。点火前の混合ガスの圧力（以下，初圧という）の最大値は，容器 A については 1.5 kg/cm², B と C では 1.0 kg/cm²（kg/cm² はゲージ圧，以下同じ）とした。

2.3 実験方法

実験対象とする点火側容器（容器A，B，Cのいずれか）についてLとWの組合せを定め，これに従って点火側容器に蓋をセットする。この際，点火側容器内壁と蓋の外壁とが偏心はめあいとなるように，蓋を片押ししながらボルトで均一に締めつける。スキが最大となる部分に相応するよう切欠きの位置を合わせることにより，スキの間で消炎されなかった火炎は必ず引火側に伝わるようにした。この方法では，実際にはめあい部において構成されているスキの大きさを測定できないが，この値は前述したように偏心直径差Wに等しいと仮定し，セットする時点でのボルト締めつけの不整などによるばらつきに対し，実験日をかえて同じLとWについて数回のくり返し測定を行って最も火炎逸走しやすかった条件下での結果を採用することと，Lの刻みを小さくすることにより影響を少なくした。蓋をセットした点火側容器は，引火側容器のフランジにパッキンを介してボルト締めする。

毎回の実験では点火側・引火側両容器中を 1 mmHg（絶対圧）以下の真空とし，予混合ガスを所定の圧力にまで満したのち，点火側容器中で点火する。点火は高圧放電火花（ネオントランス，入力100 V，出力 15 kV，20 mA）によった。点火プラグは電極の長い特製のもので，点火側容器の中心軸上で任意に点火位置をかえることができる。

引火側容器中に爆発が生じたか否かは，圧力の測定により判定した。圧力変化は圧力変換器（共和電業製 PE-30KF 型エンジン指圧計）で検出し，増幅器（共和電業製，DPM-AT 型動歪計）により増幅し，この出力を電磁オシログラフ（三栄測器製，FR-101 型ビジグラフ，ガルバノメーターG500A型）上に時間-圧力のカーブとして記録させた。

同一の初圧で一定回数爆発実験をくり返して火炎逸走しないときは，この圧力を非引火初圧（Limiting Safe Pressure，以下 L.S.P. と略すことがある）と定義して，スキの消炎能力を比較する基準値とした。爆発実験のくり返し回数は，最高 15 回連続としたが，条件によっては 10 回とした場合もあるので，具体的な回数は実験結果に併記する。この回数のくり返しのうち 1 回でも引火側に爆発が生ずれば，火炎がスキを通過したか否かといった機構*3は全く度外視して，単に「引火した」という表現で示した。

非引火初圧を求める場合に，初圧をどのように変化させるかが結果に著しく影響する。筆者らの経験によれば，例えば初圧 a で 10 回連続して引火しないような場合でも，a より高い初圧 b で「引火させた*4」あと初圧を下げていくと，a ではもちろん，さらに低い初圧でも引火する。本報でいう非引火初圧とは，このようにいったん引火させたあと初圧を下げて引火しないところを求めたものである。ただし，2.2 の項で述べたガスの最高初圧で引火しないときは，その圧力を非引火初圧としている。初圧の変化のさせ方は，非引火初圧が予測できるか否かにより異なるが，まず引火するところを求め，次に初圧を下げて引火しないところを求め，次第に幅を狭くしつつ圧力を上下させていくという原則をとった*5。

初圧を変化させるときの刻みは時間さえかければ幾らでも小さくできるが，実験条件の差異の影響も大きくなる。この研究では，容器 A については加圧側で 0.05 kg/cm²，減圧側では 10 mmHg，容器 B，C についてはこれらの値は 0.1 kg/cm² および 25 mmHg を最少刻みとした*6。初圧の設定は減圧側は水銀マノメータにより，加圧側は分銅式標準圧力計により較正したブルドン管圧力計により行なった。

---

*3 いわゆる visible flame がスキを通過しなくても引火側に爆発の生ずることがある。

*4 他の条件が同じであれば初圧の高いほど引火しやすい。したがって，極端に小さいスキでなければある程度初圧をあげることにより引火を生ぜしめることができると考えてよい。

*5 非引火初圧の見当が全くつかない場合は，例えば次のようにする。まず初圧を大気圧としてテストし，引火しなければ 0.5 kg/cm² に初圧をあげ，引火すれば 0.3 に下げる。ここで所定回数テストして引火しなければ 0.4 に初圧をあげる。ここで引火しなければ 0.4 kg/cm² を，もし 1 回でも引火すれば 0.3 kg/cm² を非引火初圧とする。

*6 例えば容器Aで，あるスキに対する非引火初圧が 0.65 kg/cm² であるならば，それより 0.05 高い 0.7 kg/cm² では所定回数の爆発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。

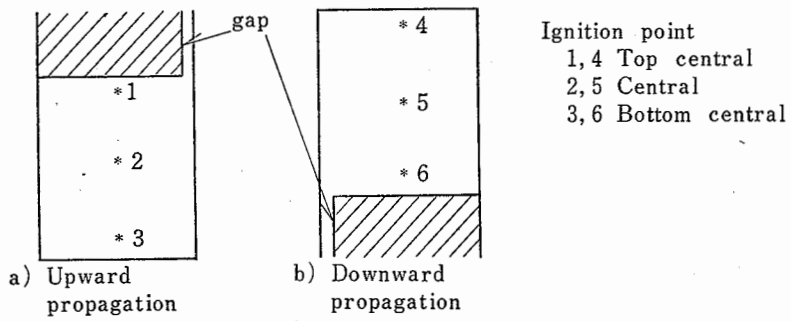

Fig. 2 Relative positions of ignition points and quenching gap (preliminary experiments)
点火源とスキの位置関係（予備実験）

2.4 実験条件の決定

安全上のデータを得るためには，実験はすべて最も引火しやすい状態で行なう必要があるが，ここでは火炎の伝播方向（容器系の設置方法），点火位置および最適ガス濃度について予備的に大まかな実験を行ない，これらの条件をどうするか決定した。ただし，この予備実験はこれらの因子が引火しやすさにどう影響するかを定量的に求めることを目的としたわけではないので，同一条件下で3回連続して引火しなければ引火なしとし，初圧の刻みは 50 mmHg という粗さである。なお，ガス温度（気温），湿度などの大気条件によって変動しうる因子の影響はすべて無視した。

2.4.1 火炎伝播方向および点火位置

実験は $L=25$ mm，W は各容器について最も大きい値（以下，単に $L=25$，$W=0.38$ というふうにスキを表現することがある）で，ガス濃度は 30% 付近である*7。点火位置はすべて容器の中心軸上であるが，スキとの相対関係を上方および下方伝播の場合について **Fig. 2** に示す。

容器Aについては，点火位置をスキから最も離れたところ（Fig. 2 の *3 または *4）とし，火炎の伝播方向は上方（容器軸が鉛直方向，Fig. 2 の（a）に相当する），下方（Fig. 2 の（b））および水平（容器軸が水平）とし，水平の場合はさらに最大スキが上，下，横の各位置について比較した。非引火初圧はいずれの場合も同じ値となった。次に上方伝播の場合について点火位置を中心および下端（Fig. 2 の *2 および *3）として比較したところ，中心点火の方が低い非引火初圧を与えた。これらの結果を，容器BおよびCについての結果とともに **Table 2** に示す。

*7 ひとつの容器については同じガスを用いて比較した。

点火位置（Fig. 2）のうち，*1 および *6 は蓋の底から約5mm 離れており，*2 および *5 は $L=25$ のときの点火側容器の有効空間のほぼ中心である。容器が大きくなると点火位置の影響がみられ，特にスキに近い所で点火すると火炎逸走しにくいと考えられる。Table 2 の結果を考慮し，伝播方向と点火位置の条件は **Table 3** のとおりとして以後の実験を行なった。なお，$L<25$ では点火位置が容器有効空間の中心からずれてくるが，その影響は小さいと考えた。また同時に容器内容積が増加するが，これについてはのちに考察する。

2.4.2 最適ガス濃度

水素-空気系では，当量濃度より幾らか濃い目のガス濃度において最も火炎逸走しやすいことがすでにわかっている。ここではいま検討しようとする円筒はめあいスキに対しても同じことがいえるかどうか，またぼう大な量の実験をすべて同一のガス濃度で行なうことは不可能であるので，どの程度の濃度範囲であればほぼ同じ火炎逸走特性が期待できるか，この2点について確認するため，容器Aを用い，$L=25$，$W=0.38$ の場合について濃度と初圧をかえて実験した。**Fig. 3** はその結果であるが，○は同一の濃度・初圧で3回のテストを行なって引火しなかったことを，●は3回のうち少なくとも1回は引火したことを意味する。Fig. 3 から明らかなように，29～33%の間では同じ結果が期待できそうであるが，実験ガスの濃度は 31±1% と定めた。なお，この結果はあくまでも $L=25$, $W=0.38$ のスキについてであって，例えば $W=0.1$ でもやはり 30%付近で最も引火しやすいことを意味するものではない。したがって，以下にのべる実験結果はあくまでも 31±1% の濃度のガスについてであって，必ずしも爆発限界内にある水素-空気混合ガスのすべてに対し

Table 2 Results of preliminary tests
予備実験の結果

Ignition chamber	Length of flame path mm	Diametral clearance mm	Direction of flame propagation	Ignition point	L. S. P. mmHg(abs)
A	25	0.38	upward	*2	325
			〃	*3	370
			downward	*4	370
B	25	0.36	upward	*1	470
			〃	*2	420
			〃	*3	370
			downward	*4	370
			〃	*5	370
			〃	*6	370
C	25	0.37	upward	*1	565
			〃	*2	300
			〃	*3	300
			downward	*4	325
			〃	*5	300
			〃	*6	420

Table 3 Experimental conditions determined by preliminary tests
予備実験により決定した火炎伝播方向と点火位置

Ignition chamber	Direction of flame propagation	Ignition point
A	upward	central
B	downward	central
C	downward	central

て安全に適用される非引火初圧ではないと考えておく必要がある。

3. 実験結果

円筒はめあい部のスキ W とスキの奥行 L をかえて非引火初圧を求めた結果を，それぞれの容器について **Fig.** 4～6 に示す。爆発実験のくり返し回数は，容器Aについては，$L=25$ のとき 15 回，L が 20 以下で

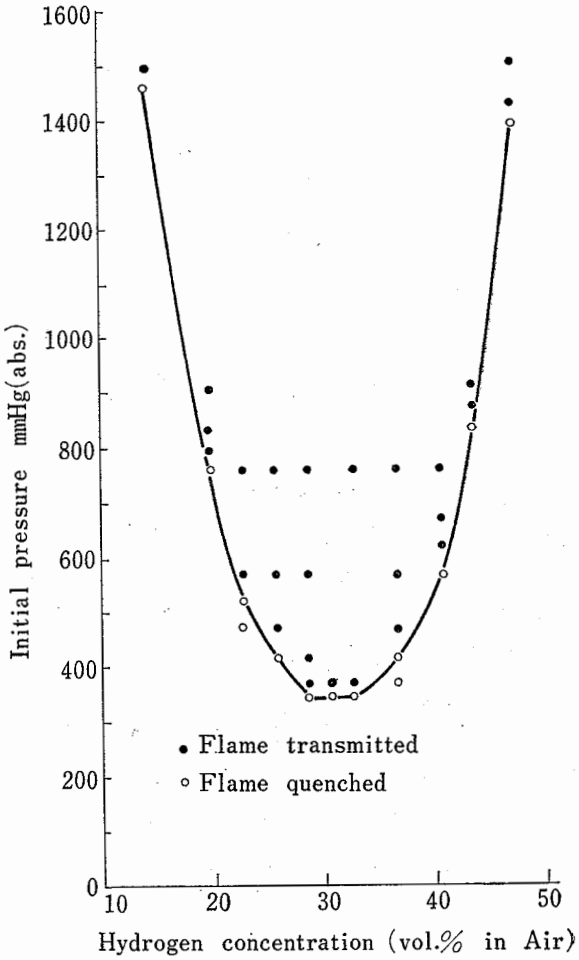

Fig. 3 Effect of gas concentration on flame quenching (Ignition chamber A, $L=25$, $W=0.38$, central ignition, upward flame propagation)
水素濃度と消炎特性の関係

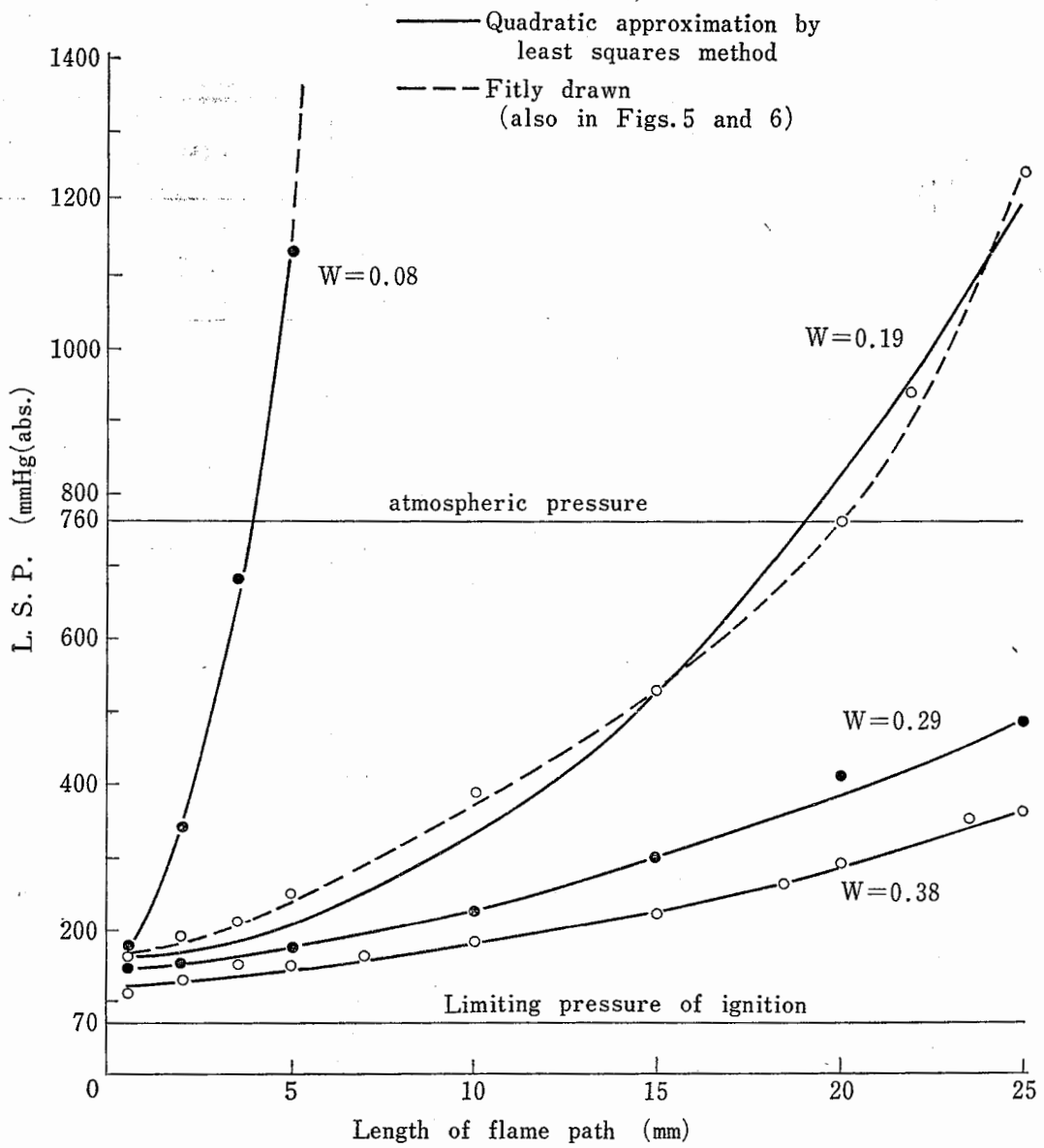

Fig. 4 Relation between Limiting Safe Pressure and length of flame path (gap length), Ignition chamber A
非引火初圧とスキの奥行の関係（容器A）

は10回，容器B，Cについては $L=25$ のとき10回とした。この範囲の実験では6～10回目に引火したのは1例だけであったので，容器B，Cの L が20以下では回数は5回とした。また同じ W と L の組合せについて2～5回の実験を行ない，図のプロットはそのうちの最低の非引火初圧である*8。

図では，あるスキに対してスキの奥行をかえた場合に非引火初圧がどのように増減するかを示した。実線は，個々の W に対して，L. S. P. が L の2次関数であると仮定して最小2乗近似法により求めた曲線である。近似させるに際しては，2，3の飛び離れデータを無視し，L. S. P. が低目の値をとるようにした。また，L が減ずるほどL. S. P. が減ずることは経験的に明らかであるので，近似式によるL. S. P. が $L>0$ で最小値をとるという結果のえられた場合には，$L=0$ で最小値をとるような関係式に再度近似させた。L.S.P. が大気圧をこえる場合には，大気圧を760 mmHg，1 kg/cm²=736 mmHg として換算したので，この場合には大気圧変動分およびゲージ読みとりの誤差が含まれ，数値的には厳密性をかくが，実用上は0.25 kg/cm²，

*8 容器Aで $W=0.08$，Bで0.08，Cで0.09のとき，$L=7$ に対するL. S. P. はそれぞれ1860，1500，1500(mmHg)をこえる値である。

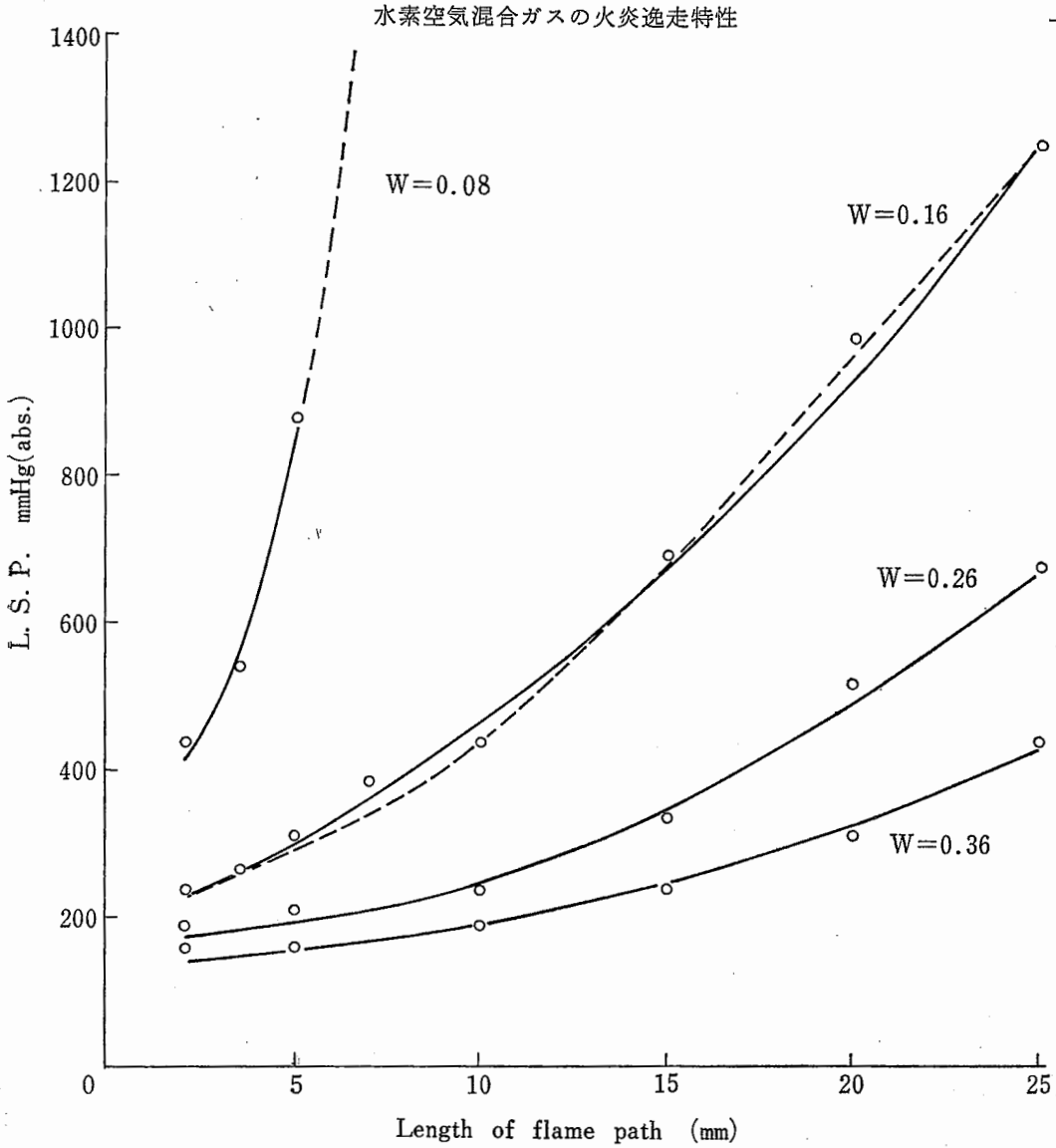

Fig. 5 Relation between Limiting Safe Pressure and length of flame path, Ignition chamber B
非引火初圧とスキの奥行の関係（容器B）

0.5 kg/cm² といった圧力値で比較すればあまり影響しない。

図から明らかなように，2次式に近似させて数値的に処理してもよい場合がほとんどであるが，2，3の曲線はデータとの差が大きく，これらに対しては，図の破線に近似させるほうがより正確である。

4. 考　　察

4.1 円筒はめあいスキの消炎能力（Lの効果）

本報では非引火初圧 L. S. P. をスキの消炎能力比較の基準としたので，L. S. P. が大なるほど消炎しやすい(火炎逸走しにくい)スキといえる。Fig. 4～6 の曲線はすべて同じ傾向を示しているので，容器 A (Fig. 4) について一般的特徴を考察してみる。

L. S. P. はLの増すにつれて増加する。増加の度合は W が小になるほど著しい。すなわち，わずかなLの増加により大きな消炎効果が期待できる。一方，W=0.29 と 0.38 ではこのような効果は望みがたく，このことは「Wがある程度大きいなら，Lを幾ら大きくしても消炎できない」という従来の知見にほかならない。(W=0.38 に対する曲線を外挿すると L=46 で L. S. P. は760（大気圧）をこえることになり，それほど大きくないLで一応火炎逸走を止めることができそうである。)

Wがさらに大となれば，図の曲線はその位置を下げ

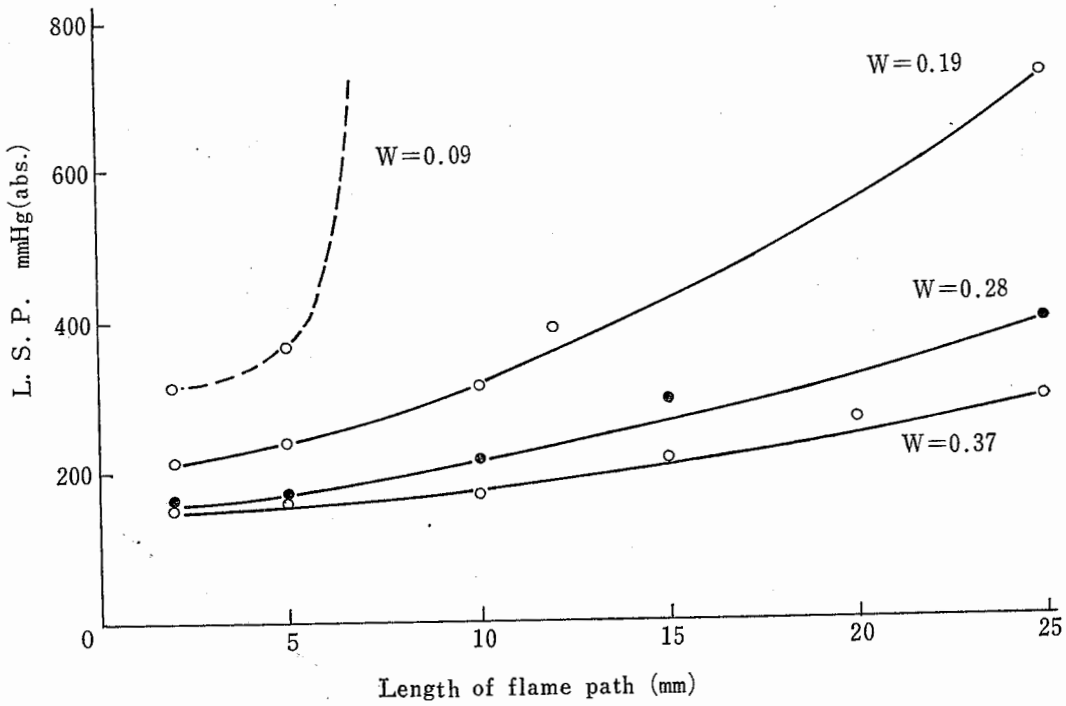

Fig. 6 Relation between Limiting Safe Pressure and length of flame path, Ignition chamber C
非引火初圧とスキの奥行の関係（容器C）

るとともに次第に直線に近づくと推定される。この直線の勾配はWの増加するとともに小さくなり，限界値としては横軸に水平な直線に接近する。このような極限ではLの値にかかわらず L. S. P. は一定となり，Lを限りなく大きくしても火炎伝播を阻止することはできない。このことが先に述べた「WとLに関する従来の知見」に対する明確な説明となることに疑問の余地はない。

Fig. 4 で L. S. P. とLの関係を示す曲線が，Wの増加とともに下方に移動することはすでに述べた。この移動に伴う曲線間のへだたりは W の増すにつれて次第に小さくなるので，L. S. P. ＝一定 となる直線を与えるWはかなり大きな値となることが予想されるが，次のようにして限界の L. S. P. およびWを推定することができる。

L. S. P. の限界値は，Wが十分大きい場合を考えれば直ちにわかるように，この混合ガスの火炎伝播限界圧力に関係する。容器A中で点火させた場合，初圧 80 mmHg では火炎伝播するが，70 mmHg では 10 回連続して火炎の伝播は生じなかった。この容器の内径は 60 mm であり，一方いま考えている W はそのほぼ 1/100 のオーダーであるので器壁の影響に差があるとみられる。80 mmHg という圧力が熱エネルギー的にみて火炎伝播を維持するための限界圧力と仮定すれば，細隙中に侵入した火炎が器壁から熱を奪われつつ伝播するためには混合ガスの初圧はより高くなければならない。ここで W=0.38, L=0.5 のときの L. S. P. が 110 mmHg であることを考え合わせて，Wが 1 mm 程度以下の場合の L. S. P. を 100 mmHg と仮定しても大きなまちがいはない。この仮定に従えば，例えば L=25 における L. S. P. が 100 となるような W が求まれば，これが，Lを幾ら長くしても火炎逸走を阻止できない限界のスキの大きさである。

L=25 の場合についての推定は実験結果からは困難であるが，L=2 の場合は W の増加による L. S. P. の減少率は小さく (Fig. 7 参照)，この場合の限界 W を求めれば次のようになる。いま W=0.19, 0.29, 0.38 について L. S. P. が W の 2 次関数であるとして近似させると，曲線は W=0.6 付近で極小となるが，物理的にはこの曲線は極小値はとらないので W の増加とともに減ずるとして，W>0.6 では L. S. P. は W=0.55 と 0.60 のときの値を結ぶ直線上を変化すると仮定した。L. S. P. ＝100 とこの直線の交点を求めると，限界 W は約 0.85 mm となる。なお，この限界の W は，

混合ガス圧力が 100 mmHg のときの消炎距離と定義されるべき性質の値であり，水素-空気混合ガスの大気圧下における消炎距離の実測値（0.50～0.64 mm）[3] に比して妥当な値といえよう。

4.2 スキの大きさと非引火初圧の関係

スキの奥行を一定とした場合に，W を減ずることによるスキの消炎能力の増加がどのようになるかは，耐圧防爆構造の容器のスキの設計上興味ある点である。**Fig.** 7～9 は，Fig. 4～6 の結果にもとづき L=一定としたときの L. S. P. と W の関係を示すものである。

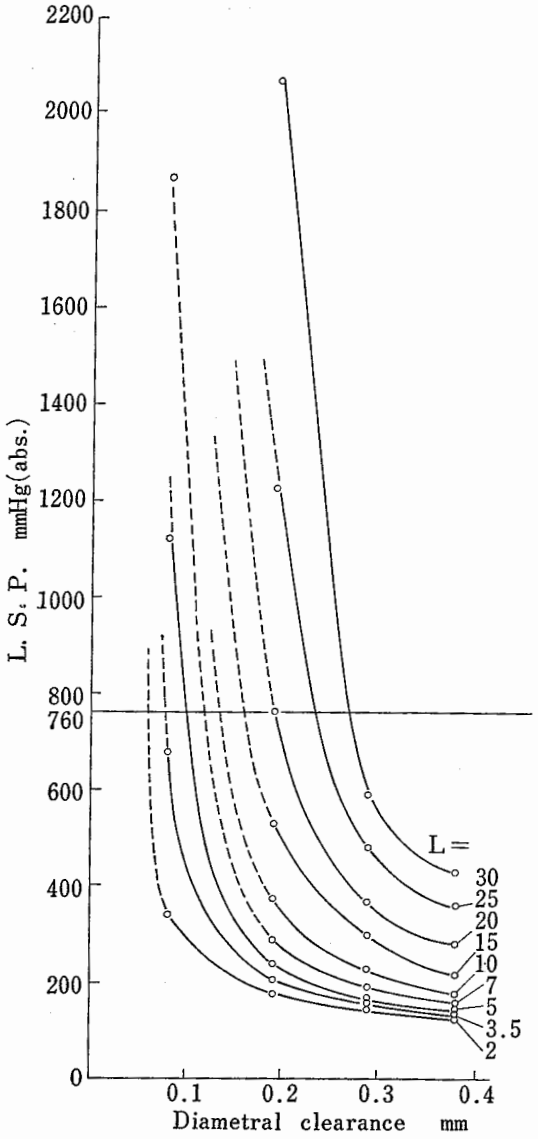

Fig. 7 Relation between Limiting Safe Pressure and diametral clearance (gap width), Ignition chamber A
非引火初圧とスキの大きさの関係（容器A）

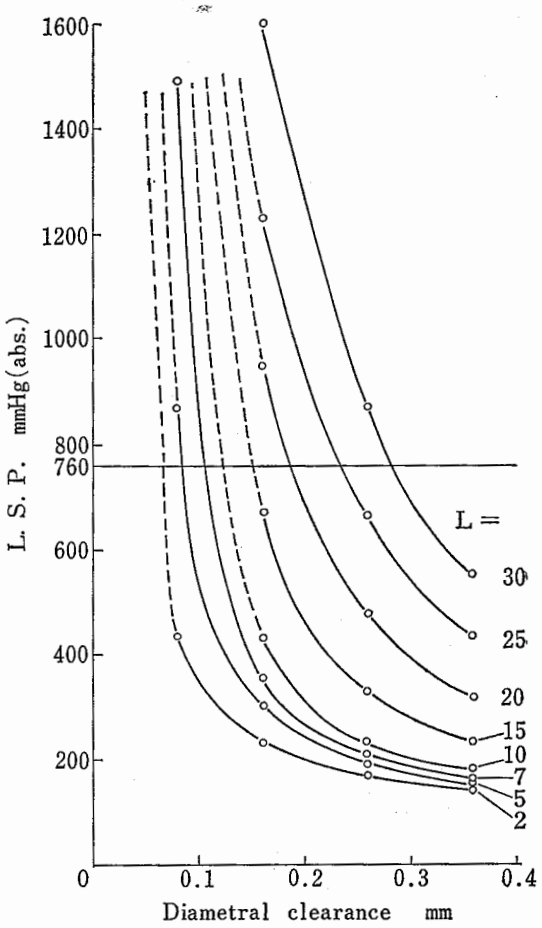

Fig. 8 Relation between Limiting Safe Pressure and diametral clearance, Ignition chamber B
非引火初圧とスキの大きさの関係（容器B）

図のプロットは Fig. 4～6 でえられる L. S. P. の推定最低値をラウンド・ナンバーとしたもので，L=30 の場合は近似式からの計算値である。なお，おのおのの曲線の一部は，L. S. P. を W の 2 次関数に近似させたときの関係式によって描いてある*9。

これらの図から明らかなように，L が 5 以下では W を極めて小さくしなければ消炎は困難であり，L の値がある程度より大の場合に W を小さくとることによって初めて火炎逸走防止のためのスキとして有効であり，かつ実用的であることがわかる。

$L \geqq 10$ では，大まかにみて W=0.2 付近で L. S. P. が（したがって消炎能力が）急激に増大する傾向がみられる。これは実際上大きい意味をもっており，次節

*9 例えば Fig. 7 では，L=7 のときの L. S. P. を 1860 mmHg (1.5 kg/cm²) としてプロットした。また，各曲線の急激な立上り部分の勾配は L が小さいほど急になるとして実測値のない部分を補ってある。

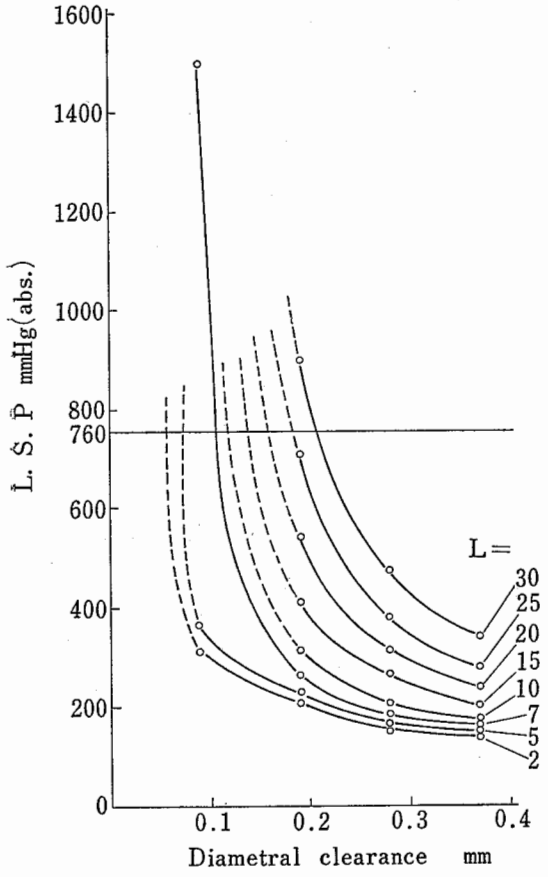

Fig. 9 Relation between Limiting Safe Pressure and diametral clearance, Ignition chamber C
非引火初圧とスキの大きさの関係（容器C）

以下において応用上の問題としてさらに具体的に検討する。

4.3 セーフ・ギャップの推定

冒頭に述べたように，爆発等級3のガスに対する耐圧防爆構造の容器の接合面のスキの設計には，セーフ・ギャップの値が必要である*10。本節では，すでに述べた実験結果にもとづき，実用上の見地から3種類の容器に対するセーフ・ギャップはどの程度の値となるかを推定する。

推定方法は同様であるので容器Aについて述べる。セーフ・ギャップは混合ガス圧力が大気圧の場合の爆発火炎の阻止に対して定義されるので，760mmHgを大気圧として，Fig.7 に L.S.P.=760 なる直線をひく。この直線と曲線群の交点は，Lをある長さとしたときのセーフ・ギャップの推定値を与える。

これらの推定値は，曲線群の一般的傾向からみて妥当な値と考えられるが，仮に推定値の範囲を与えるならば，交点間の距離を比例配分し，例えば $L=25$ についてであれば，$L=22$ と 18 に対する W を求めこれを範囲とすればよいが，セーフ・ギャップ自体はそのまま機器の設計に利用されるわけではなく，また後述するように設計値をセーフ・ギャップの 1/2 とすることには（特に W が 0.2mm 程度という場合には）十分な安全性が含まれるので，ここでは推定値の範囲はとりたてて考えないことにする。

Fig. 10 は，こうして求めたセーフ・ギャップの（推定）値をLに対してプロットしたもので*11，図の直線は W が L の一次式で示されると仮定して最小自乗法により求めた近似式を意味する。**Table** 4 は幾つかのLについて W の推定値と近似式による W の値とを比較したものである。なお，$L>25$ の場合の W の推定値は，Fig.4～6 の近似曲線を外挿した際に L.S.P. が 760mmHg をこすときの W と L の値であるが*11，近似式による計算値とかなりよい一致を示している。

なお，$L=0$ のときの W は，ナイフ・エッジで構成されるスキを考えた場合に，エッジ間距離が W であっても火炎逸走しないという限界のスキを意味するが，いずれの容器についてもこの値はほぼ同じという結果は興味深い（Fig.10）。

次に，容器内容積（爆発空間）の大きさがセーフ・ギャップにどう影響するかであるが，Table 4 から明らかなように，容器AおよびBでは差がみられず，容器Cでは幾分小さめの値となっている。一般に内容積の増すにつれてセーフ・ギャップの減ずることが知られているが，本報での結果からは内容積とセーフ・ギャップの関係を論ずることはできない。

また，実験方法から明らかなように，Lをかえることにより容器内容積は変化した。内容積の変化の影響が最も著しいのは容器Aについてであるはずであるが，上述の結果によれば容器Bの結果とほぼ同じセーフ・ギャップが得られているので，多少の内容積の変

*10 火炎逸走しない最大スキという意味で，従来「最大実験的セーフ・ギャップ」という語が使われているが，これはスキを変化させる刻みを無限に小さくしたときの限界値である。ここでは，こうした限界値か否かは問題とせず，とにかく火炎逸走しないスキの大きさという意味で「セーフ・ギャップ」という語を用いる。

*11 例えば Fig.6 で $W=0.38$ のとき，近似曲線を外挿すると $L=46$ で L.S.P. は 760mmHg（大気圧）をこえる。この場合，$L=46$ のときのセーフ・ギャップの推定値は 0.38 であるとする。Fig.10 で $L>25$ のときのプロットはこうした値であるが近似直線は $L\leqq30$ について求めてある。

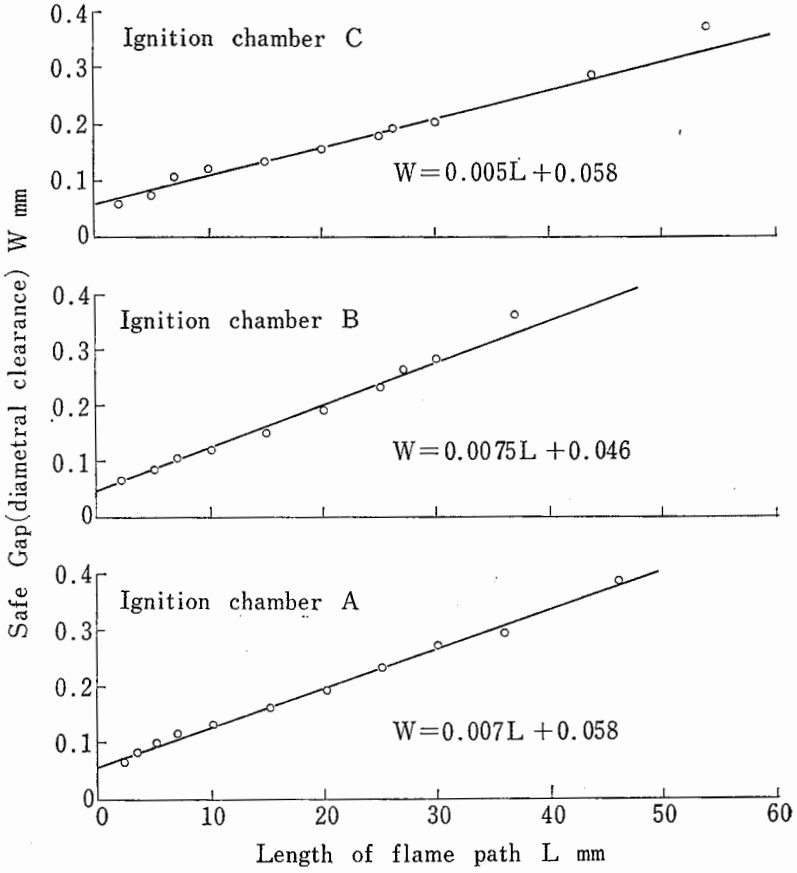

Fig. 10 Relation between length of flame path and Safe Gap for each ignition chamber
スキの奥行とセーフ・ギャップの関係

Table 4 Estimated Safe Gaps for each ignition chamber
セーフ・ギャップの推定値

Ignition chamber	Iength of flame path mm	Safe Gap mm	
		Plotted data in Fig. 10	Calculated value by equations in Fig. 10
A	46	0. 38	0. 380
	36	0. 29	0. 310
	30	0. 27	0. 268
	25	0. 23	0. 233
	20	0. 19	0. 198
	15	0. 16	0. 163
	10	0. 13	0. 128
	5	0. 10	0. 093
B	37	0. 36	0. 324
	30	0. 28	0. 271
	27	0. 26	0. 249
	25	0. 23	0. 233
	20	0. 19	0. 196
	15	0. 15	0. 157
	10	0. 12	0. 121
C	54	0. 37	0. 328
	44	0. 28	0. 278
	30	0. 20	0. 208
	26. 5	0. 19	0. 191
	25	0. 18	0. 183
	20	0. 16	0. 158
	15	0. 14	0. 133
	10	0. 12	0. 108

Table 5 Comparison of Safe Gap data reported
セーフ・ギャップ報告値との比較

Length of flame path mm (inch)	Type of joint	Safe Gap mm(inch)	Volume of enclosure cm³	Shape of enclosure	Reference No.
25.4(1)	Flanged	0.28(0.011)	8000	sphere	4)
		0.27	8000	sphere	7)
		0.22	8000	sphere	8)
		0.30(0.012)	4000	hemisphere	5)
		0.28(0.011)	500	sphere	5)
		0.30(0.012)	250	hemisphere	5)
		0.34(0.0135)	50	cylinder	6)
	Spigot	0.185	1920	cylinder	This report (calculated)
		0.237	450		
		0.236	100		
12.7(1/2)	Flanged	0.18(0.007)	8000	sphere	5)
		0.23(0.009)	500	sphere	5)
		0.30(0.012)	250	hemisphere	5)
		0.25(0.01)	50	cylinder	6)
	Spigot	0.122	1920	cylinder	This report (calculated)
		0.141	450		
		0.147	100		
6.35(1/4)	Flanged	0.24(0.0095)	50	cylinder	6)
		0.24(0.0095)	10		
	Spigot	0.090	1920	cylinder	This report (calculated)
		0.094	450		
		0.102	100		

化の影響は無視しても差しつかえない。さらに，内容積としては $L=25$ の場合の大きさを基準にすれば，L がより小さい場合のデータを含めて検討した結果は安全側にあるとみなされ，$L>30$ についての結果を参考値にとどめれば実用上もなんら問題はない。なお，$L=25$ のときの内容積を保持したままで Fig. 4 のような L.S.P. と L の関係を求めたとすれば，ある W についての曲線は L が 25 のときのプロットを中心として，$L>25$ では下側に，$L<25$ では上側にそれぞれわずかずつ移動し，かつ幾らか直線に近ずくことが予想される。

Table 5 にはこれまで報告されている結果の幾つかを示した。これらはいずれも平面フランジ結合からなるスキを対象としているが，実験条件がおのおの異なるにもかかわらず比較的よい一致を示しており，また，はめあい結合についての本報の結果にも近い値であることがわかる。このうち Jones ら[5]は，点火位置が中心でもフランジの内側付近でもセーフ・ギャップは同じだと報じており，火炎伝播速度の大きいガスでは点火位置の影響は無視できそうである。これに本報の予備実験の結果を考え合わせると，容器中心点火のデータが一般に適用性を有すると考えられる。

4.4 耐圧防爆構造の機器への応用上の問題点

4.4.1 スキの設計値

内容積が 2,000 cm³ 以下で，長さと径の比があまり大きくない円筒容器のはめあい結合部におけるスキとスキの奥行の設計値は，現行指針の考え方に従えば **Table 6** のごとくになる。表のスキの大きさ（最大直径差）は，Fig. 10 のプロットの W の値の 1/2 から端数を減じた値であり，スキの設計に際しての大まかな

Table 6 Fundamental design data for spigot joint of flameproof enclosure
はめあい結合のスキの設計の目安

	Volume of enclosure V cm³									
	$2<V\leqq100$				$100<V\leqq450$			$450<V\leqq1920$		
Minimum length of flame path L mm	10	15	20	25	15	20	25	15	20	25
Maximum diametral clearance W mm	0.06	0.08	0.09	0.11	0.07	0.09	0.11	0.07	0.08	0.09

目安とすることができる。

前述のIEC勧告では，はめあい結合に対しては*12，容器内容積が500 cm³ 以下では最大直径差0.1 mm，スキの最小長さ9.5 mm，500をこえ6,000 cm³ 以下に対してはこれらの値を0.1，25としており，単に数値のみを比較すればTable 6の値はかなり安全な値といえよう。しかし，実際に0.1 mm以下というようなスキのはめあい結合を有する機器（容器）の製作，保守などには困難の伴うことが予想される。

4.4.2 安全率のとり方の検討

スキの設計値が与えられても，加工上困難であればけっきょくのところ爆発等級3のガスを対象とする機器は製作されず，安全性の劣る機器で代用されることになり，現実にもそのようなケースがみられる。筆者らは，安全性が保証され，かつ加工上も無理のないスキをもつ機器が使用されるほうが防災上より安全であるとの立場に立って，安全率のとり方に検討を加えてみる。もとよりこれは，現在の内外における考え方とは相容れぬものであり，実験結果にもとづいての単なる考察と解されたい。なお，スキの設計値はその機器についての爆発試験によりえられたデータにもとづいて求めるという原則が以下の論議の前提である。

まず第1に，スキの設計値をセーフ・ギャップの1/2とすることの安全性はどうか。

例えばFig.7から明らかなように，Wが小となるにつれてL.S.P.は急激に増し，スキでの消炎は容易になる。一般に$W>0.4$では曲線の変化率が小となって，例えば$W=0.6$とその1/2の0.3とに対するL.S.P.の差は小さくなる。Fig.7では減圧下においてこの傾向が明らかであるが，爆発等級1，2のガスに対してはこれに相当する曲線群が右上方に移動すると推測され，仮りに同じような傾向がL.S.P.が大気圧の付近でもみられるとすると，機器の設計値をセーフ・ギャップの1/2とすることは単なる機械的操作にすぎず，相当の安全率をとっているようにみえるが，事実はそれほど安全でないということにもなりかねない。

これに反し，$W<0.3$では曲線の変化率が大きく，わずかのWの減少によってもL.S.P.は極めて大きい変化を示す。例えば$L=30$の推定値については，セーフ・ギャップは0.27であるが，この1/2のWに相当するL.S.P.の近似計算値は約3.7 kg/cm²（ゲージ圧）であり，$L=25$のセーフ・ギャップ0.23の1/2のWに対しては約2.0 kg/cm²となり，それぞれ混合ガスの初圧がこのような高圧の場合の火炎逸走に対してまで安全をみていることになる。このように，セーフ・ギャップの1/2をとる方法は，セーフ・ギャップの大きい場合にはあまり安全とはいえず，逆の場合には過大な安全性を要求することになる。合理的な方法として，セーフ・ギャップの大きさ（およびスキの奥行）に応じた安全率のとり方を検討する余地がある。

第2に，スキの奥行で安全率をとる方法はどうか。

奥行Lでの爆発試験により求めたセーフ・ギャップがWであったとしたときに，スキの設計値はWとしたまま奥行をLのα倍($\alpha>1$)とすることは，セーフ・ギャップが約0.2 mm以下となる場合には十分安全であることが示される。例えばFig.4で$W=0.19$（破線）の場合についていえば，$L=20$で火炎逸走を止めうるが，これに対し$L=25$で設計するとすれば，このスキは混合ガスが0.5 kg/cm²のときの爆発火炎をも阻止することができるであろう。安全率αは2である必要は全くなく，また，$W=0.2$に対して定めたαはWがそれより小さい場合により安全に適用されることは言をまたない。（なお，このようなスキの奥行で

*12 我国の指針では，はめあい結合とフランジ結合は静止部分のスキとして同じに扱われているが，IEC勧告では特に水素を対象とする機器についてこの両者をわけており，フランジ結合に対するスキの許容値の方が小さくなっている。

安全率をとる方法は，ねじ込結合を火炎逸走防止の手段とする場合にも適用することができるので，将来更に検討されるであろう。)

第3に，爆発試験を行なう際の混合ガスの初圧で安全率をとる方法があげられる。ある一定のスキについては，混合ガスの初圧の高いほど火炎逸走しやすいことは本報の結果をまつまでもなく明らかである。したがって，大気圧より十分高い圧力条件下で爆発試験を行なって引火しなければ，そのときのスキおよびスキの奥行を大気圧下で使用される機器の設計値とすることは安全である。ガスの圧力をどの程度とするのが適当であるかは別問題として，このような方法は設計値を定めるための爆発試験が簡略化されるという利点を有することを強調しておく。

以上の3つの方法はおのおの独立した方法とみられるが，ある場合にはひとつの現象に対して見方を変えたときの結果ともみられ，これらの方法を部分的に組み合わせる方法も可能である。いずれにせよこうした考え方は，爆発時の容器の変形，スキの広がりなどの影響が少ないはめあい結合に対する安全率のとり方としては妥当であり，スキの加工性も向上すると考えてよいであろう。

最後に，実験的に興味あるひとつの事実を付記する。すでに述べたように，本報の実験はスキの奥行が減ずるとそれに応じて容器内容積が増すという条件下で行なった。しかし，当初は蓋の底部にスキの奥行の変化分に等しい厚さの円盤をとりつけることにより，容器内容積を一定に保ち，かつ点火位置も容器中心からずれないようにと試みたのである。円盤の外径は容器内径より 2mm（セーフ・ギャップの 10 倍のオーダー）小さいにもかかわらず，この円盤の存在によってそれとわかるほどの L.S.P. の増加がみられた。

爆発火炎の消炎過程における器壁の影響を考慮するならば，この事実は容易に認容でき，ある程度の大きさのスキと，セーフ・ギャップのオーダーの（奥行が短かい）スキとの段つきのはめあい結合によっても火炎逸走は防止できることが予想され，またこのようなスキのとり方が実際上都合がよい場合もあると思われる。

5. 結　　言

細隙中における消炎に関する実験的研究の一環として，円筒状のはめあい結合からなるスキにおける当量濃度付近の水素-空気混合ガスの爆発火炎の火炎逸走特性を，1.5 kg/cm² 以下の圧力について検討した。実験には大きさの異なる3種の円筒容器を用い，各容器についてはめあい結合部のスキ（直径差）とスキの奥行を変化させた。あるスキとその奥行の組合せについて混合ガスの初圧をかえて火炎逸走の有無を観察し，同一条件において少なくとも5回連続して火炎逸走しないときの混合ガスの初圧を非引火初圧（L.S.P.）と定義して，これをスキの消炎能力を比較するパラメータとした。

なお，これらの結果から，あるスキの奥行に対して L.S.P. が大気圧となるスキ（いわゆるセーフ・ギャップ）を推定した。はめあい結合に対するセーフ・ギャップの実験値は従来殆んど知られていないが，本報の結果は水素を対象とする耐圧防爆構造の電気機器の設計における基礎データとして利用することができる。

本報における主なる論点を列挙すれば次のとおりである。

1) 一定のスキに対しては，スキの奥行を増すことにより L.S.P. が増加し，増加の度合はスキの小なるほど著しい。実験した範囲内では，L.S.P. はスキの奥行に関する2次式としてほぼ近似させることができた。

スキが 0.2mm 程度より大きくなると奥行を増すことによる効果は少ない。スキがある程度より大きいと，奥行を幾ら長くしても火炎を阻止できないことが知られているが，本報ではこのことを明確に説明できた。スキの奥行に関係なく常に火炎が逸走するような限界のスキは 0.85mm 以上と推定され，このときの混合ガスの初圧は約 100mmHg（絶対圧）という低い値であり，初圧が大気圧のときの消炎距離の報告値（0.5～0.64mm）に比して十分小さい値である。

2) スキの奥行を一定とすると，スキを減ずるにつれて L.S.P. は増加するが，この傾向はスキが 0.2～0.3mm 以下の場合に著しい。奥行が 10mm 程度以下では実用上火炎逸走防止のためのスキとしては不適当なようである。

3) セーフ・ギャップの推定値をスキの奥行が 25 mm の場合について示せば，容器内容積が100，450，1920 cm³ に対しておのおの 0.23，0.23 および 0.18 mm であり，平面フランジ結合について得られている

従来の結果に比して同等あるいはやや小さい値である。

4) スキの奥行が50mm程度以下ならば，セーフ・ギャップ(W)とスキの奥行(L)は近似的に $W=a+bL$ なる直線関係にあるとみなしてよく，スキの奥行 $L=0$ のときに $W=a(a>0)$ となることが予測される。

5) 水素を対象とする機器について，セーフ・ギャップが 0.2mm 程度であるのにスキの設計値をこの1/2とすることは過大な安全性を要求することになり，実用上問題がある。はめあい結合を有する機器に対して，爆発試験の結果からスキの設計値を求めようとするときの安全率のとり方について2，3の提案をした。

(注) 本報において各種変数間の関係を最小2乗近似法により推定する際には，当所電算機システムを利用して計算した。

(謝辞)

本研究を行なうにあたり，(社)産業安全研究協会・ガス警報器研究小委員会から実験容器の提供などの協力をえた。ここに記して謝意を表する。

(48.5.28 受理)

参 考 文 献

1) 工場電気設備防爆指針（ガス蒸気防爆 1970），労働省産業安全研究所
2) Electrical apparatus for explosive gas atmospheres.
Part 1 : Construction and test of flameproof enclosures of electrical apparatus, IEC Recommendation, Publication 79-1(1971)
3) A. E. Potter Jr, "Flame quenching", Progress in Combustion Science and Technology Vol. 1 (1960) Pergamon Press
4) P. B. Smith and J. R. Blackwell, "Redetermination with Hydrogen/Air Mixtures of Maximum Safe Gap for 1 Inch Relief Flanges", ERA Report D/T 117 (1959)
5) D. H. Jones *et al*, "Maximum Safe Gaps with Hydrogen/Air Mixtures in Various Flanged Vessel", ERA Report D/T 135 (1962)
6) H. G. Riddlestone, "Safe Gaps for Enclosures of Small Volume", ERA Report No. 5092 (1965)
7) L. Urbankoba, "Redetermination of (explosion) limit gap for hydrogen", Ropa Uhlie (Czech.) 7, (5), 154 (1965)
8) 鶴見，松田，"水素濃度とセーフ・ギャップの関係についての研究"，産業安全研究所報告 15, (1), 11 (1967)

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-22-1

昭和48年11月30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 614.838 : 536.46

水素-空気混合ガスの火炎逸走特性

——はめあい結合に対するセーフ・ギャップの推定——

林　年宏・鶴見平三郎

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-22-1, 1～17 (1973)

はめあい結合からなるスキにおける爆発火炎の消炎に関する実験を，当量濃度の水素-空気混合ガス（圧力 1.5 kg/cm²G 以下）について行なった。実験には3種の円筒容器を用い，一定のスキ（直径差 0.4 mm 以下）とスキの奥行（25 mm 以下）について火炎逸走の生じない限界の混合ガス圧力を求めた。この圧力を特性値としてスキの消炎能力を比較することにより，スキにおける消炎を支配する因子との関係について有益な知見をえたほか，水素を対象とする耐圧防爆構造の電気機器のスキの設計に利用できるデータがえられた。

（表6，図10，参8）

UDC 614.838 : 536.46

Flame Quenching of Hydrogen-Air Mixtures under Low and Reduced Pressures

——Estimation of Maximum Safe Gaps for Diametral Clearances——

by T. HAYASHI and H. TSURUMI

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety RIIS-RR-22-1, 1～17 (1973)

Flame quenching abilities of various sizes of spigot joints were studied with stoichiometric hydrogen-air mixtures on three cylindrical enclosures. For a certain combination of gap width (diametral clearace) and gap length (length of flame path) the Limiting Safe Pressure, initial pressure of gas mixture which gave at least five successive quenchings, was determined to compare the relative quenching ability of that gap. Limiting Safe Pressures could effectively explain the quantitative influence of gap width and/or gap length on flame quenching in such gaps. From the results of experiment Safe Gaps for flameprooof enclosures were also estimated. (6 Tables, 10 Figures, 8 References)