

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1977

アセチレン-空気炎の爆ごうへの転移及びその中断
—管路に挿入した多孔板の影響について—

林 年 宏

アセチレン—空気炎の爆ごりへの転移及びその中断

—管路に挿入した多孔板の影響について—

林 年 宏*

Transition to and Decaying of Detonations in Acetylene-Air Mixtures

—Effects of Perforated Plates in Tubes on Flame Travelling—

by Toshihiro HAYASHI*

It has been well known that flames occurred in a tubular vessel containing explosive gas mixtures could transit to detonations after travelling some distance, provided the composition of the fuel-air mixture and the geometry of vessel are in adequate ranges. Because of the high destructive power of a detonation, it would be important, from the viewpoint of safety, to prevent the transition to detonation or, when the transition has been attained, at least to interrupt the detonation before it travels a long distance. When attempting to prevent the transition to detonation, informations are necessary for various conditions on the detonation induction distance (D.I.D), along which flames should have travelled after an ignition in order to transit to detonation, and also on methods of delaying the transition to detonation.

This report describes about D.I.D for acetylene-air mixtures in 1- and 2-inch enclosed tubes, and about effects on D.I.D. of such factors as acetylene contents and initial pressures of mixtures, and length of tubes through which flames travel.

Effects of various perforated plate, inserted in the test tube against to flames, are also studied, and the result is obtained which proves that any perforated plate does never accelerate a flame propagation, but, on the contrary to the traditional opinions, delays the flame development and thus the transition to detonation.

Further experiments are carried out to obtain some knowledge on behaviours of a detonation when it comes upon any perforated plate in its travelling way. It is shown that detonations could be decayed temporarily through the perforated plate with holes of relatively small diameter. Although detonations may be interrupted directly using such quenching element as sintered metal, they would be more easily quenched after their temporary decayings. Those results mentioned above indicate that the desing of a detonation arrester may be possible, which is composed of a perforated plate (i.e. a detonation decaying part) and some form of quenching element, the latter should be positioned before the point of re-transition to detonation of decayed flames.

* 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

1. 緒 言

爆ごう（デトネーション）は火炎の伝播する形態のひとつであり、伝播速度と破壊力の大きいのがその特徴である。長い配管などの内部の爆発性混合ガスが発火すると、火炎は最初燃焼波として比較的ゆっくり伝播するが、混合ガスが爆ごう限界内の濃度であれば、ある距離を経たのち急速に伝播速度を増し、爆ごうへと転移する。爆ごうに転移した直後には異常に大きい伝播速度が観察される（これをオーバー・シュートと呼ぶ）が、安定な爆ごうとなったあとは一定速度となり、その速度（以下、爆速という）は静止混合ガス中を伝わる音波の速度よりも大きい。

爆ごうについての理論的解析はかなり進んでおり、化学平衡を考慮に入れた計算により爆ごう波の諸特性値を求める方法も開発され、理論と実験がよい一致を示すことが知られているが、燃焼から爆ごうへの転移のメカニズムについてはまだ十分に解明されたとは言えないようである。

本報では、1および2インチの密閉直管中におけるアセチレン-空気混合ガスの火炎伝播速度（以下、単に火炎速度または速度ということがある）の変化を測定し、混合ガスの濃度・圧力、管の長さなどがこれにどう影響するかをしらべた。この結果、混合ガスに点火したのち爆ごうに転移するまでに火炎が進む距離（爆ごう誘導距離という）を種々の条件について求めることができた。爆ごう誘導距離に影響する因子はいろいろあるが^{1,2)}、実験の結果は、それらの因子について具体的なデータを与えると同時に、爆ごう誘導距離についての大まかな目安を与えるものである。

この報告ではまた、1インチ管中に挿入した多孔板が火炎速度に及ぼす影響についてもしらべた。筆者は

すでに水素-空気系について、多孔板により爆ごうが中断することを示したが³⁾、本報では中断後に爆ごうへ再転移するまでの挙動について論じた。更に、爆ごう誘導距離に対する多孔板の影響をも検討したが、これは、爆ごうを中断させたあと消炎するというタイプのデトネーション・アレスタの中断機構部として多孔板を用いることの可否をしらべたものである。管路に存在して火炎を乱す作用をなすであろうような障害物は、火炎伝播を加速し、爆ごうへの転移を促進するとされているが^{1,2)}、本報の実験では爆ごうへの転移が逆に遅らされるという結果が得られた。

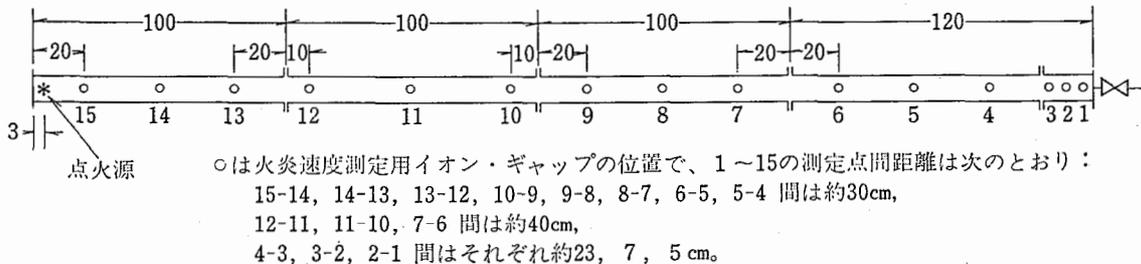
2. 実験（1インチ管）*1

2.1 爆ごう管および多孔板

内部で爆ごうを生ぜしめる爆ごう管は、呼び径1インチ（内径約28mm）の配管用炭素鋼管で、両端にフランジを溶接した長さ約1mのもの4本、0.2mのもの1本を用意し、全長を約4.2mから1.2mまで可変できるようにした。図1には全長約4.2mの場合を示す（各部寸法はmm単位で求めたが、図には概略値のみを示す）。点火用ヒータの中心位置は、管の全長と無関係に常に点火端から約3cmのところである。

多孔板は既報³⁾の実験に用いたものであるから詳細は略するが、厚さ6mm、外径40mmの鋼製円板に直径 D_0 の孔を N ヶ幾何学的に対称となるようにあけたもので、円孔群に外接する円の直径は常に爆ごう管の内径以下である。使用した多孔板の D_0 と N を表1に示す。 $N=1$ 、 $D_0=28$ とは、多孔板が無い場合に相当する。

多孔板（ $N=1$ 、 $D_0=28$ のものも含む）は、図2に示すハウジング中に組みこんで爆ごう管のフランジ間



○は火炎速度測定用イオン・ギャップの位置で、1～15の測定点間距離は次のとおり：
 15-14, 14-13, 13-12, 10-9, 9-8, 8-7, 6-5, 5-4 間は約30cm,
 12-11, 11-10, 7-6 間は約40cm,
 4-3, 3-2, 2-1 間はそれぞれ約23, 7, 5cm。

図1 爆ごう管：全長約4.2mで多孔板のない場合
 （単位はcmで、数値は概略値）

*1 2インチ管についての実験および結果は5.において述べる。

表 1 多孔板の孔の径 (D_0) と数 (N)

D_0 (mm)	2	4	6	10	28
N	8	9	5	4	1
$\bar{D} = \sqrt{N} D_0$	5.7	12	13.4	20	28

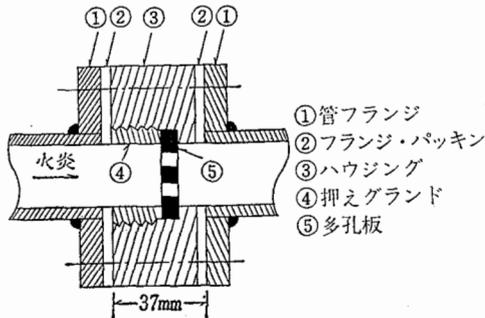


図 2 多孔板の取付方法 (スケッチ)

に取付ける。ハウジングの取付位置は管全長により異なるが、図 1 でいえば 13.12, 10.9, 7.6 の各測定点間である。ハウジングの組みこみにより、その前後の測定点間距離 (従って管全長も) は約 4cm ずつ増加するので、多孔板を用いる実験での管全長は約 4.24, 3.24, 2.24m と記述することにする。なお、多孔板と点火源あるいは測定点との間の距離は、必要に応じて実験結果に併記する。

爆ごう管内面は、実験前に油布で粗いサビを落とすだけとした。イオン・ギャップ用点火プラグは、先端が管内面とつらいちになるようにした。フランジ接続部のパッキン内径は 40mm で、管内径よりは大きい。これらの要素が火炎伝播の様相に影響するとしても、爆ごうへの転移を促進する側へ作用するであろうから、爆ごう誘導距離としては内面が平滑な管の場合より小さい値となるであろう。なお、管全長の変化に伴う接続部や点火プラグの数の変化の影響は無視した。

2.2 実験ガスおよび実験の手順

実験には 8~15% のアセチレン-空気混合ガスを用いた。アセチレンは最も爆ごうに転移しやすいガスのひとつであり、実験上爆ごうを再現させやすいので実験ガスに選んだ。また、他のほとんどの可燃性ガスの爆ごう誘導距離はアセチレンの場合より大であるとみられ、結果の利用という点でもアセチレンが適する。ガス濃度が 16% を越すとスガが発生し、6% 以下では火炎伝播の再現性が悪いので、実験対象外とした。

毎回の実験に際しては、水平に設置された爆ごう管

中を 2mmHg (絶対圧) 以下の真空とし、予混合ガスを所定の圧力まで満したのち点火する。点火時のガス圧力 (初圧) は最高 1kg/cm² (ゲージ圧。以下同じ) までとし、点火はニクロム線ヒータ (線抵抗約 1.5 オーム, 印加電圧 DC 3V) によった。

火炎速度の測定はイオン・ギャップ法によった³⁾。図 1 の 1~15 の測定点に取付けた点火プラグの電極間にはそれぞれ 90V の直流電圧が印加されており、火炎が到達するとパルス状の電圧を生ずる回路が組まれている。2 測定点間についてこのパルスの生ずる時間差が分れば、2 点間の距離とから平均速度が求まるので、これを火炎速度とした。ふたつの回路からのパルス出力の時間差の測定にはユニバーサル・カウンタの時間間隔測定機構を用い、計時の開始と紙了の信号レベルは 500mV に設定した。

3. 爆ごうへの転移に関する実験の結果および考察

3.1 火炎速度の変化のパターン

管中における火炎速度の変化は、点火源からの距離 x と、その点における火炎速度 V の関係として示す。いま火炎速度測定用イオン・ギャップ A および B の点火源からの距離を x_A および x_B とし、A・B 間の平均火炎速度を V_A とすると、 x - V 図では、点火源からの距離 $x = x_A + (x_B - x_A)/2$ に対する速度は $V = V_A$ であるとプロットされる。このようにして、隣り合う 2 点間の平均速度を 2 点の midpoint における速度としてプロットすれば、それらのプロットを結ぶ曲線は火炎速度の変化を示すものである。火炎速度の変化のパターンは、その条件下で爆ごうに転移するか否かにより、また管路の多孔板の有無によって、以下に示すようにそれぞれ特徴ある形をとる。

多孔板の無い、比較的長い管中における火炎速度の変化は、図 3 の (A) に示すパターンをとる。すなわち、点火源から数 10cm の間はほぼ一定速度 ($dV/dx \approx 0$) で進み、このあと次第に加速し ($dV/dx > 0$)、爆ごうに転移するところで極大値を示し、そのあとは一定値となる。この最終的な一定値がその条件下での爆速 (爆ごう速度) である。こうした速度変化は現象論と一致するものであるが、速度の極大となる位置および極大値はその前後の変化の様相から外挿せざるを得な

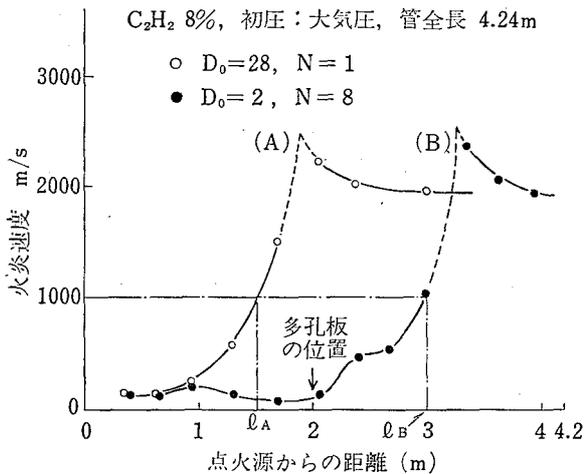


図3 火炎速度の変化のパターン (爆ごうに転移する場合)

い。また、爆ごうに転移する附近での速度変化は、後述する爆ごう誘導距離の定義と関連するので、やや詳細に考察することにする。なお、その際には定常爆速の値が必要となるが、表2にその値を示す。

いま、爆ごう転移位置附近の速度測定点を、点火源に近い方からA, B, C, Dとし、それぞれ隣り合う2点間の平均速度を V_A, V_B, V_C (m/s) とする。爆ごうへの転移過程を理解しやすいのは、 $V_A \leq 1,000, V_B \geq 1,500, V_C > 2,000$ というパターンである (図3の(A)参照)。この場合には、たとえ V_A が静止混合ガス中の音速を越えていても、それは見掛け上ガスの流動速度が加算されているのであって、転移はA・B間ではなくB・C間で生じたと解される。なぜならば、もしA・B間で転移があれば V_B は2,000を越すはずだからである。B・C間では、B点から転移までの間とオーバー・シュートによる過大速度が相殺され、 $V_B \geq 1,500$ となる。C・D間ではオーバー・シュート

表2 アセチレン濃度と爆速の関係

濃度 (Vol.%)	計算値 (m/s)	実測値 (m/s)
16	2,039	—
15	—	2,056
14	2,023	—
12	1,993	2,002
10	1,945	1,941
8	1,876	1,876

計算値は、当所松井技官が当所電算機システム FA COM 230/35 を用いて計算した結果であり、実測値はこの実験から求めた平均値である。

表3 爆ごう転移前後の火炎速度 (漸増型)

アセチレン濃度 (%)	火炎速度 (m/s)		
	V_A	V_B	V_C
15	1,082	1,699	2,265
	1,075	1,979	2,139
	1,059	1,899	2,186
12	1,039	1,708	2,326

の影響が残るため、 V_C はその濃度における爆速よりもかなり大きい。ところで、上述のパターンで速度が変化する場合に測定される V_A の最大値 $V_{A(max)}$ は、爆ごうに転移する直前に火炎がどの程度までの速度をとり得るかという目安になる。換言すれば、火炎速度が次第に増加して $V_{A(max)}$ に達したとすれば、その直後には爆ごうへ転移すると予測される。表3には、 $V_A > 1,000$ となった例を示す*2。8 および10%については該当するデータが無いが、大体のところ $V_{A(max)}$ は1,000~1,100 m/s と見られる。

今まで述べたような漸増型の速度変化は、実験全体を通じてもそれ程多くは観察されない。爆ごうに転移する場合の大部分の速度変化は、 $V_A \leq 1,000, V_B > 2,000$ というパターンをとる。この場合にはA・B間では転移しておらず、B・C間で転移してオーバー・シュートがあったと解される。このパターンの速度記録を調べたところ、 $V_A = 633 \sim 1,084$ (m/s) であった。 V_A の小さい方の値は、上述の $V_{A(max)}$ との対比で言えば、「この速度に達したとすれば、その直後には爆ごうへ転移する可能性がある」とみなすべき値である。しかし、A・B間で低速度であった火炎は、例えば次のB・C間で爆ごうへ転移するにしても、むしろC点に近い方で転移するであろう。従って、 V_A が小さければ V_B も相対的に小さくなることが予測され、この予測は表4に示すように実験結果と一致する*2。

表3および4には V_A の大小について極端な場合を示したので両者の異同が明確ではないが、速度変化は漸増型であれ急増型であれ、実質的には同じである。つまり、ある条件での火炎伝播の仕方と速度測定点の位置が相対的に少しづれることにより、いずれのパターンをもとり得る。例えば、漸増型の場合の V_A の測定区間がもう少し点火源側へ近寄ったとすれば、 V_A

*2 これらの速度が、管中のどの地点で測定されたかは、いま問題ではないが、爆速はガス濃度により変わるので、濃度の区別のみ示した。

表 4 爆ごう転移前後の火炎速度 (急増型)

アセチレン濃度 (%)	火炎速度 (m/s)	
	V_A	V_B
15	1,082	2,341
	1,067	2,319
12	1,084	2,349
	1,081	2,396
	669	2,111
	652	2,152
10	1,073	2,345
	633	2,027

はより小さく、逆に V_B はより大きくなり、その結果は急増型の場合の V_A と V_B の関係にほかならない。ただ、ここで留意すべきは、表 3 および 4 の V_A の大きい方の値がいずれもほぼ同じオーダーの値であることであって、これらの 1,050~1,080 m/s という速度は (測定点の位置が多少変わったにしても)、爆ごうへ転移する直前の限界速度とみなすことができる。

管中に多孔板が有る場合の爆ごうへの転移過程は、後に述べるように多孔板の種類に影響されるが、一般的特徴としては、火炎速度が途中で一旦減ずること、および、 $x-V$ 図が滑らかな曲線とならずに、少くともひとつの段差を生ずることを挙げることができる。しかし、爆ごうへ転移する附近の挙動については多孔板の無い場合の記述がそのまま当てはまる (図 3 の (B) を参照のこと)。

爆ごうへ転移しない場合については、管の全長や多孔板の有無が影響することは勿論であるが、それらとは別に、転移しない条件下での火炎伝播が本質的に不安定であることの影響も大きく、結果にはかなりのバラツキが生ずる。従って、一般的に速度変化のパターンを示すことはできないが、 $x-V$ 図が振動する曲線となることが多い。

3.2 爆ごう転移点の定義

管中を伝播する火炎がどこで爆ごうに転移したかを、見掛けの火炎速度のみから判断することは必ずしも正確ではないが、前節に述べた $x-V$ 図で、例えば速度が最大 (これは定常爆速よりも当然大きい) となる

ところからあとを爆ごうとみなすのもひとつの考え方である⁴⁾。この場合には、火炎速度が最大となるところを爆ごう転移点と定義することになり、点火源と転移点間の距離が爆ごう誘導距離となるわけである。本報の実験で求めた火炎速度は連続的なものではないため、 $x-V$ 図で V が最大となる点を (予測することはできるが) 正確に定めることはできず、従って上述の方法をそのまま適用するには無理がある。

一方、前節で論じたように、ある測定区間で 1,000 m/s 台の速度が測定されたとすれば (本来爆ごうへ転移する条件下にあれば)、次の区間では爆ごうに転移することはほぼ確実であり、更に、転移直前の速度変化の様相 ($x-V$ 図の曲線の変化率) は、他の実験条件に余り影響されないことが (種々の条件下での $x-V$ 図の比較検討から) 分っている。

これらのことから、火炎速度が 1,000 m/s を越えれば爆ごうへ転移したのとほとんど同じであるので、これをひとつの基準値として、点火源と $x-V$ 図で $V=1,000$ となる点との距離 l を爆ごう誘導距離と定義してみる (図 3 の横軸の l_A および l_B を参照)。このように定義すると、

- 1) $x-V$ 図では、 $V=1,000$ となる点の方が、火炎速度が最大となる点よりも、正確に求め得る。
- 2) l が小さければ、火炎速度が最大になる (と予測される) 点までの距離もまた小さい。従って、爆ごう誘導距離の尺度としていずれの値を用いても、結果は相対的に同じであるとみなしてよい。
- 3) 爆ごう誘導距離の目安としての実用上の意味からは、 l を用いる方が安全側である。

という結果になるので、以後、ここに定義した l を爆ごう誘導距離の指標として論議を進める。

3.3 転移しやすさの尺度

一般に、爆ごうへの転移しやすさを比較する尺度として用いられるのは爆ごう誘導距離であり、これが小なるほど転移しやすい条件とされている。しかし、同一条件下での実験であっても結果にはバラツキが生ずるので、得られた結果のうちの最小値をもってその条件下での爆ごう誘導距離とすることになるが、限られた回数の実験に基づいて最小値を定めるのは危険であり、何らかの方法でこれを補う必要がある。

本報では、同一条件下での繰返し実験において、ある特定の測定区間の火炎速度がある一定値を越える回数

が全実験回数のうち何回か、という割合 (P) を導入した。この P と、前節で定義した l の両者を用いれば、転移しやすさの比較をより正確に行なうことができる。火炎速度の比較値としては、1,000 および 2,000 (m/s) を選んだ。2,000 という値は、爆ごうに転移してしまっただけを示す速度である。定常爆速が 2,000 m/s 以下ということもある (表 2) が、その場合でも転移直後はオーバー・シュートのため常にこの値を越える。1,000 という値は、2,000 の 1/2 であると同時に、前節で定義した爆ごう誘導距離を求める際の基準速度に等しく、爆ごう転移直前の状態か否かを比較するための速度である。いま、 $X \cdot Y$ および $Y \cdot Z$ というふたつの区間で火炎速度を測定し、 $X \cdot Y$ 間での速度が 1,000 m/s を越す割合を P_X 、 $Y \cdot Z$ 間での速度が 2,000 m/s を越す割合を P_Y として、ある条件 (I) のもとでは $P_X=80\%$ 、 $P_Y=100\%$ 、別の条件 (II) のもとでは $P_X=30\%$ 、 $P_Y=90\%$ であったとすれば、条件 (I) の方が転移しやすいとみなすことができる。このような場合には、条件 (I)、(II) における爆ごう誘導距離の最小値 l (I)、 l (II) の関係は l (I) $<$ l (II) となるのが普通であるが、実験回数の相異なるなどが原因となって、必ずしもこの関係が成立しないこともある。

3.4 爆ごうへの転移に影響する因子

3.4.1 初 圧

図 4 は混合ガスの初圧が爆ごうへの転移しやすさに及ぼす影響を示す例である。図の下半分には爆ごう誘導距離の最小値 (l) を示したが、上半分では前節で述べた P を用いて比較した。実験回数は各々 3 回で、例えば $V_{7.6} > 2,000$ とは測定点 7・6 間での速度が 2,000 m/s を越すという意味を持つものとする、図の●の

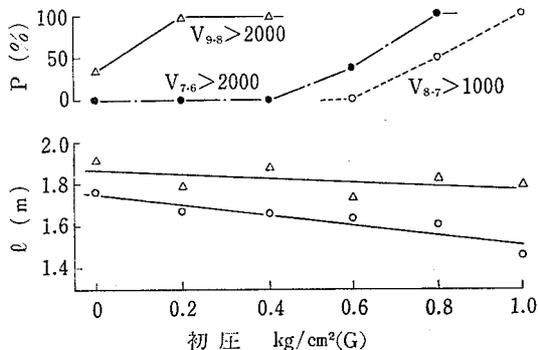


図 4 爆ごうへの転移に及ぼす初圧の影響 (△は管全長が 4.2m, ○と●は 3.2m の場合)

条件では 7・6 間の速度は初圧が 0.4 以下では 3 回とも 2,000 (m/s) 以下であるが、初圧 0.6 では 3 回のうち 1 回が、初圧が 0.8 以上では 3 回とも 2,000 を越すことになり、初圧の高いほど転移しやすいとみなすことができる。一方、 l に対する初圧の影響はあまり著しくないが、全体としては初圧の大なるほど l は減ずる傾向にあり、定性的には P と l のいずれでも同じ結果が得られた。

3.4.2 管 長

爆ごうへの転移過程を考察すれば、火炎が伝播する管の長さが転移しやすさに影響することが予測される。図 5 は、管全長を変えたときの火炎速度の変化を、点火源からの距離に対してプロットしたものの例である。図からは、管長が短くなるにつれて僅かずつではあるが爆ごうへの転移が早くなることが分る。一方、管長を次第に減ずればもはや爆ごうへ転移しなくなる限界の長さがあることも事実であり、本報の実験の範囲では、管長が 1.2m のときには爆ごうへの転移は 1 回も確認されなかった。

燃焼から爆ごうへ転移する過程では火炎前方の圧縮波の強さが重要な役割を果たすが³⁾、管長が短いほど反点火側管端からの圧縮波の反射の戻りが早く、従って圧縮波はより強められ、燃焼の加速の度合も大きく、この結果爆ごうへの転移も促進されると考えられる。しかし、容易に爆ごうへ転移するような条件下では、管端での圧縮波の反射はそれほど重要でなくなり、管の長さ自体は転移にあまり影響しなくなるであろう。

3.4.3 ガス濃度

図 6 は多孔板の無い場合、および、多孔板が有っても爆ごうへの転移には影響しない場合³⁾について、ア

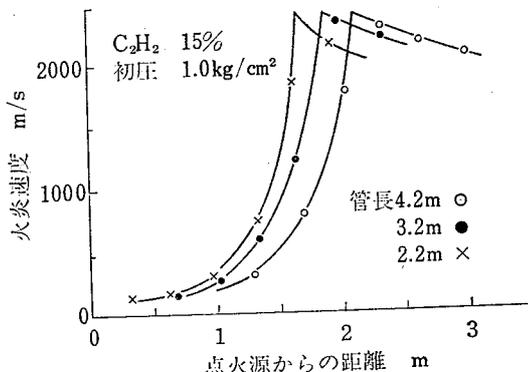


図 5 火炎速度の変化に及ぼす管長の影響

*3 後に示すように、多孔板が点火源から十分離れている場合には、爆ごう誘導距離は多孔板の有無には影響されない。

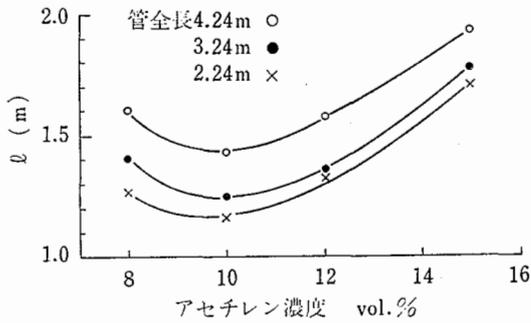


図6 アセチレン濃度と爆ごう誘導距離(l)の関係

セチレン濃度と爆ごう誘導距離の最小値(l)の関係を示したものである。8~12%の範囲では濃度による l の差は数10cm以下とわずかであるが、アセチレン10%付近で最も爆ごうへ転移しやすいとみなすことができよう。

3.4.4 多孔板の位置および種類

多孔板の影響は、その位置と種類に分けて考えなければならない。多孔板の位置は点火源からの距離で示し、多孔板の種類は $\bar{D} = \sqrt{N} D_0$ で与えられる平均孔径 \bar{D} で示すこととする(表1)。平均孔径という概念は多孔板による爆ごうの中断に関する研究³⁾において用いたものであるが、多孔板の特性は大まかに見て多孔群の開孔面積の和によって代表されるであろうとの仮定に基づいた指標である。

図7は、爆ごう誘導距離の最小値(l)に対する多孔板の位置の影響を種々の条件について示したものである。図は管全長が4.24mの場合であるが、この場合には、図3からも分るように、点火源から1m付近は火炎が丁度加速され始める所であり、ここに多孔板があると一旦減速し、この結果爆ごうへの転移は遅れ

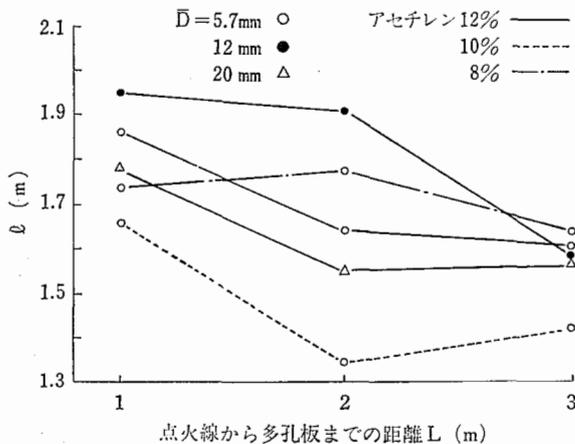


図7 多孔板の位置と爆ごう誘導距離(l)の関係 (管全長4.24m, 初圧が大気圧の場合)

る。一方、多孔板が点火源から十分離れている場合には、多孔板の有無やその種類に関係なく爆ごう誘導距離は一定とみなせる(これについては後に更に言及する)。つまり、多孔板へ達する以前に爆ごうへ転移してしまっているような条件下では、多孔板の影響は見られない。従って、図7で $L=3m$ のときの l は、それぞれの条件下で多孔板の無い場合の l と殆んど同じである。次に、点火源からの距離 L が約2mの場合であるが、もし l が本来2mより十分小さくなるべき条件下であれば、 $L=3m$ の場合と同様に多孔板は転移に影響しないはずであり、また L が2mでも3mでも l は同じ値をとるであろう。しかし、 \bar{D} の比較的小さい多孔板が管中に存在すると、これはそこに半ば閉塞された管端があるのと同じ効果を与えるであろうから、先に述べた管長についての論議に従えば、点火源から多孔板までの距離の短い方が l の値が小さくなるかもしれない。図7の下側の3例はこの予測に合致する(但し、 l の数cmの差は実験誤差の範囲であろう)。Guenoche は、管中を伝播する火炎の前方に管径の縮小部があると火炎伝播速度が減少するという結果を示しており⁶⁾、こうした効果が強ければ図の上側の2例のような結果になるとも考えられるが、図7の結果には \bar{D} や濃度などの因子も含まれているため、多孔板の位置についての検討はこれ以上は行えなかった。

いずれにせよ、管路に多孔板を挿入しても爆ごう誘導距離が(多孔板の無い場合に比して)減少しないことは明らかであり、特に、多孔板が無い場合の爆ごう誘導距離内に多孔板を置けば、爆ごうへの転移をかなり遅らせ得ることが分かった。このことは管全長が3.24mの場合の結果によって更に裏付けられた。この場合の多孔板の位置は点火源から約1または2mであるが、ガス濃度が8~12%、 \bar{D} が5.7と12(mm)の範囲について実験したところ、

- 1) 多孔板が点火源から約2mのときの l は多孔板の無いときの結果と同じである：つまり、多孔板に達する以前に爆ごうへ転移してしまっている。
- 2) 多孔板が点火源から約1mのときの l は、この距離が約2mの場合の l より常に大きく、その差は39~64cmである。

という結果が得られ、火炎がまだ爆ごうへ転移しないうちに多孔板に出会うと、転移が明らかに遅らされることが分かった。多孔板の効果は次に述べるようにその種類によって大いに異なるが、その位置については、

点火源の近くよりもむしろある程度火炎の加速が始まる付近が最適であると考えられ、多孔板の無い場合の爆ごう誘導距離付近では転移を遅らせる効果は殆んどない。

次に多孔板の種類の影響であるが、図8は種々の条件下における多孔板の平均孔径 \bar{D} と爆ごう誘導距離の最小値 (l) の関係を示すものである。図から分かるように、 \bar{D} と l の関係は二種類ある。ひとつは \bar{D} の増すにつれて l の減ずる場合で、条件によっては図とは逆に下に凸となることもあるが、いずれも右下りの曲線となる。従って、 $\bar{D}=28\text{mm}$ (多孔板が無い) のときに爆ごう誘導距離は最小となり、何らかの多孔板があれば爆ごうへの転移は遅らされることになる。 \bar{D} は極めて単純に定義した値であり、 \bar{D} が等しくなる N と D_0 の組合せは無限であり、 N と D_0 が等しくても孔の幾何学的配置が影響するであろうから、単に \bar{D} のみで多孔板の影響のすべてを論ずることはできぬが、大まかに見ればこれを爆ごう誘導距離比較の目安とすることができる。図8の2本の直線は l が多孔板の種類によらないことを示す例であるが、点火源から多孔板までの距離が約2m以上のときはこのような結果となる。これは、多孔板に達する以前に既に爆ごうへ転移してしまっている場合に相当し、このような(多孔板の手前約50cmまでの間で転移するような)条件下では、多孔板の種類が爆ごうへの転移に何ら影響しない

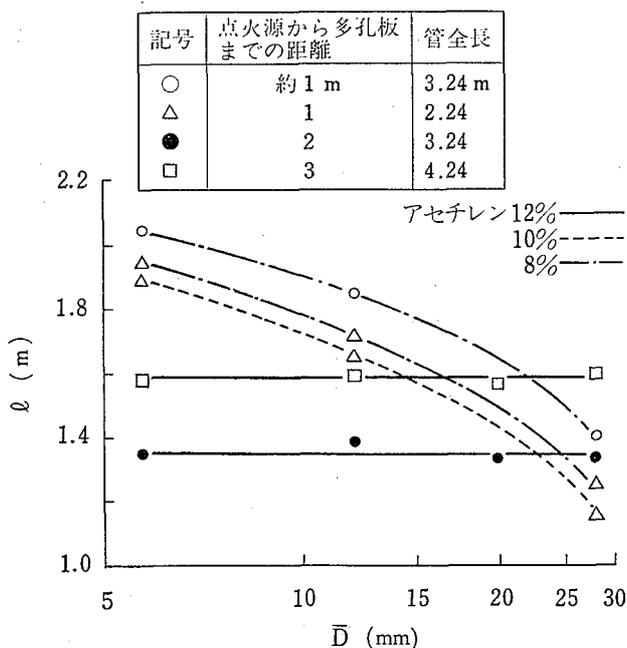


図8 多孔板の種類 ($\bar{D}=\sqrt{N D_0}$) と爆ごう誘導距離 (l) の関係

いことは明らかである。

4. 爆ごうの中断および再転移

爆ごう誘導距離以遠に置かれた多孔板が爆ごうへの転移に影響しないことは上述のとおりであるが、この場合には爆ごう波が多孔板に衝突することになり、この結果一時的に爆ごう(波)の中断が生ずる^{*4,9)}。金網や焼結金属を消炎素子とする爆ごう抑止器には、爆ごうを直接阻止するものと、一旦中断させてから阻止するものとが考えられるが、後者の原理による場合には、爆ごう中断用の多孔板と消炎素子の間の距離は重要な因子である(例えばこの距離が十分大きければ、多孔板で爆ごうは中断されるが、消炎素子に達するまでの間に爆ごうへ再転移してしまい、中断させることが無意味となる)。多孔板のあとの消炎素子の有無は当然火炎伝播の様相に影響するであろうが、ここでは消炎素子の無い場合についてのみ検討した。図9は実験結果の例であるが、図では多孔板までの経過を便宜上 $\bar{D}=28$ の場合で代表させた。また、多孔板をはさむ測定点をA, Bとすると、今まではA・B間の平均速度を用いてきたが、ここではA・B間をA点から多孔板までと多孔板からB点までのふたつの区間に分け、Aから多孔板までは爆ごうとして伝播する(そのときの爆速は多孔板の無いときのA・B間の爆速の平均値とした)ことを考慮に入れて、多孔板とB点間の平均速度を求めた。この速度を多孔板とB点との midpoint の速度としてプロットすることにより、多孔板からあとの火炎速度の変化をより明確に示すことができる。

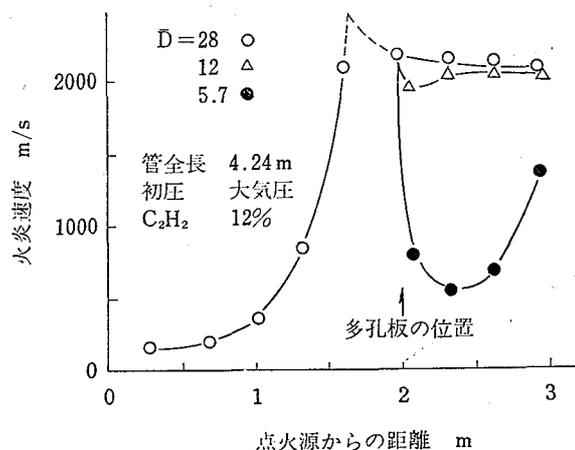


図9 爆ごうの中断に及ぼす多孔板の影響

*4 中断とは、爆ごう波が一時的にその特性を失うことを言い、火炎が消炎されるわけではない。ここでは火炎速度がその条件下での爆速に比して有意な減少を示すことを爆ごうの中断と言う。

実験はすべて初圧を大気圧として行なったが、管全長 (4.24 または 3.24m) やアセチレン濃度 (8~12%) が変わっても、多孔板からあとの火炎速度の変化は図 9 と殆んど同じパターンを (予測に反して) 示した。 $\bar{D} > 12$ では、多孔板の影響は一時的なもので、速度の減少も僅かで、多孔板からあと 40cm も進まぬ内に爆ごうへ再転移している。 $\bar{D} = 5.7$ のときは、多孔板からあとの速度減少は著しく、約 40cm 離れた地点での見掛け上の速度は約 500m/s にまで降下する。このあと火炎は再び加速されるが、実験では爆ごうへの再転移までは確認しなかった。しかし、火炎速度が最低値に達したあとの加速の様相は、爆ごうに転移する以前の速度変化のパターンから類推できるので、多孔板からあと再転移までの距離の大まかな予測は可能であろう。いずれにせよ、ここでは \bar{D} によって多孔板からあとの火炎速度の変化がどう変わるかについて基礎的なデータが得られたので、実際に消炎素子と多孔板を組合せた場合について、別の機会に更に検討することにしたい。

5. 2 インチ管中における爆ごうへの転移

2 インチ管 (内径約 53mm) を用いた実験は、管全長約 1.1~4.1m の範囲で、アセチレン濃度 10 および 12% について行ない、初圧はすべて大気圧とした。実験方法その他は 1 インチ管の場合と同じであるが、ここでは無障害管中における火炎速度の変化と爆ごうへの転移を実験の対象とした。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 管長約 1.1m の場合：濃度が 10% のときは、点火源から 40 cm 付近までは約 200m/s の速度であるが、このあと火炎速度は約 50m/s まで低下する。次いで再度 200m/s 台まで上昇するが、最終的には 100m/s 以下となった。濃度 12% では、中盤で速度が低下してそのまま加速することなく伝播が終了した。
- 2) 管長約 2.1m では、点火源から 1m 付近までは 200m/s 台の定速で (あるいは比較的ゆっくり加速しつつ) 伝播するが、そのあとは距離とともに速度が増減し、火炎が脈動しつつ不安定な伝播を繰返すことを示唆している。火炎速度の最大値としては 550 m/s が測定された。
- 3) 管長約 3.1m では、ほとんどの場合管長が 2.1m

のときと類似の挙動を示したが、濃度 10% で 10 回、12% で 9 回のテストのうち、12% での 1 例においてのみ爆ごうへの転移が認められた。このときの爆ごう誘導距離は 2.54m であった。

- 4) 管長約 4.1m では、いずれの濃度についても爆ごうへ転移するとみてよく、10 および 12% での爆ごう誘導距離の最小値はそれぞれ 2.82 および 2.86m であった。

これらの結果を 1 インチ管での実験結果と比較すると、爆ごうへ転移しない場合の挙動はいずれも似ているが、2 インチ管では爆ごう誘導距離が 2m を越すことが明白であり、管長が 3m を越す場合については、図 6 との比較から分るように、1 インチ管の方が 1m 以上も早くに爆ごうへ転移することが明らかとなった。

6. 結 言

1 および 2 インチ管中におけるアセチレン-空気炎の爆ごうへの転移について実験した結果、種々の条件下における爆ごう誘導距離について目安となる値が得られ、また、爆ごう誘導距離に及ぼす諸因子の影響について幾つかの知見を得た。

また、管路に存在する障害物は火炎伝播を加速すると考えられてきているが、実験によれば、火炎の進行方向に直角に挿入された多孔板が爆ごう誘導距離を減ずる方向には作用しないことが明らかとなった。更に、爆ごう波が多孔板に衝突すると一時的に中断されることも確認され、中断後の火炎が加速されて再び爆ごうへ転移するまでの挙動についてもデータが得られた。多孔板に関するこれらの結果は、爆ごうを中断したあと消炎素子を用いて火炎を消滅させるというタイプの爆ごう抑止器が可能であることを示唆するものであり、これについては別の機会に更に検討を加える予定である。
(昭和 51 年 12 月 14 日受理)

参 考 文 献

- 1) 疋田, 化学と工業, 16, (4), 43 (1963)
- 2) 米田ら, 高圧ガス, 6, (6), 24 (1969)
- 3) 林, 安全工学, 13, (6), 360 (1974)
林, 産業安全研究所研究報告 RR-23-3 (1974)
- 4) 疋田, “爆発”, コロナ社, p.98 (昭和 40 年)
- 5) 疋田, 秋田, “燃焼概論”, コロナ社, p.113 (昭和 46 年)
- 6) Guénoche, H., “Nonsteady flame propagation”, Edited by G. H. Markstein, Pergamon Press, p.171 (1964)

産業安全研究所技術資料

RIIS-TN-76-6

昭和52年1月31日 発行

発行所 労働省産業安全研究所
東京都港区芝5丁目35番1号
電話 (03) 453-8441 番(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108