

MAY. 1972

RIIS-RR-20-1

UDC 662.61 : 534.22

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-20-5

管路の拡大による気体爆轟波の中断 (第1報)

—アセチレン・酸素爆轟波について管路を
二次元的に拡大した場合—

松 井 英 憲

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

管路の拡大による気体爆轟波の中断 (第1報)

—アセチレン・酸素爆轟波について

管路を二次元的に拡大した場合—

松 井 英 憲**

Decaying of Gaseous Detonation by Expansion (First Report)

—Experiments in Flat Channels for Oxyacetylene Detonations—

by Hidenori MATSUI**

Detonation expansion processes were investigated in this paper in order to know the properties of gaseous detonation decaying from the view point on the problem of safety precaution in handling explosive mixtures.

When a steady detonation wave suddenly expands into a larger space, an induction period increases due to the decrease of the pressure and temperature, so that the separation of the combustion zone from the shock front occurs.

Oxy-acetylene gaseous detonation waves were initiated in the rectangular cross section tubes which were made out of transparent acrylic resin plates. Each of the tubes was enlarged in width at the halfway, the tubes before-enlargement were 4, 8, 20 and 40mm in width and 50cm in length, and the all tubes after-enlargement were 100mm in width and 50cm in length. The depth was 3mm through out the whole tubes.

Streak and still photographs were taken to obtain the detonation decayed distance(induction distance), the limiting initial pressure of decay or P_{decay} and variation of the flame velocity after expansion, for various expansion ratios of the tubes and gas compositions.

Still photographs gave qualitative explanation of the wave expansion (Fig.5). At a constant expansion ratio and gas composition, as the initial pressure was low, so the detonation decaying easily occurred, and the more the initial pressure increased, the shorter the decayed distance became. At a certain initial pressure, the detonation suddenly stopped to decay (Fig.6). This limiting pressure of decay varied with gas compositions (Fig.7).

In the case of detonation decaying after expansion, the flame velocity suddenly decreased and gradually increased until the detonation re-established. Just after the re-establishment, the detonation overdrove and showed extremely high velocity for an instant, then proceeded in steady one.

The limiting pressure of decay was proportional to expansion ratio to the power of 0.6~0.7 in common with each gas composition (Fig.8). It is shown as follows: $P_{\text{decay}} = K \cdot R^n$

$n : 0.6 \sim 0.7$

K : Constant for each gas composition

R : Expansion ratio

* 第2回安全工学国内シンポジウム (May 1971) において発表

** 化学研究部 Research Division of Chemical Engineering

1. 緒 言

爆轟、すなわちデトネーション (Detonation) は、ガス力学と結合した高速化学反応の典型であり、燃焼伝播の一形式である。その波面速度は、ある条件下で定常であり、媒質中の音速より大きいことが特徴である。可燃性混合ガスの一部に火炎が発生すると、条件によって火炎の加速が起こり、火炎前方に衝撃波を生ずる。この衝撃波によって、その直後の未燃ガスが自然発火を起こし、火炎面が衝撃波に追いつき両者が一体となって進む現象がデトネーションである。いい換えれば、火炎中の化学反応によって衝撃波が安定に維持され、一定の爆轟速度で未反応気体中を伝播していく現象である^{1),2),3)}。

ここでは安全上の立場から、ガス爆発による災害を未然に防ぐためデトネーションの伝播を阻止する方法について検討した。

可燃性の混合ガスの存在する管路において、いったんデトネーションが生ずると、その高速性と衝撃力のためこれを直接機械的な方法、または細隙によって阻止することはなかなか困難である。また、このような装置は破壊を伴うおそれがあるので相当の機械的強度を要する。

Laffitte⁴⁾が報告したデトネーション波の一つの重要な性質は、細い管の中の爆轟が急に太い管に進むと条件によってはデトネーションが一時中断し、太い管の中を燃焼がしばらく進んでから再びデトネーションに転移するということである。本研究は、この性質を利用して管路の容積を急に増してやることによってデトネーションを通常の火炎にまで減衰させようとするもので、この状態での火炎の阻止は容易である。この原理はある種のフレイムトラップに応用された例⁵⁾もあるが、定量的な取扱いをされたものは見当たらないようである。また、オリフィスを設けることによってデトネーションを中断させる方法⁶⁾が報告されているが、これも大体同じ原理を応用したものである。

2. 原 理

現在ではデトネーションの波面および反応帯は、定常一次元ではなく、非定常三次元で、波面先端は突起した部分からなる多頭構造であることが明らかにされ

ている⁸⁾。デトネーション波先端の衝撃波とそれに続く火炎面は周期的に分離、結合をくり返しており、両者の間の加熱加圧された未燃ガス中を強い反応波 (トランスバースウェーブという。)が斜め方向へ進む結果、管壁には菱形模様が、管端では蜂の巣模様が観測される。このような現象の原因は衝撃を受けた可燃性ガスが燃焼反応を起こすまでに、ある誘導時間が存在し、それがある限度をこえると衝撃波と燃焼波の分離が部分的にでも起こるところにある。

安定なデトネーション波が突然広い空間に入ると、波面直後の燃焼ガスの断熱膨張が急に大きくなるために圧力、温度が急激に低下する。そのために燃焼反応の誘導時間が長くなる。また、衝撃波と火炎面の分離は限界以上に大きくなり、デトネーション波はその特性を維持できなくなる。管の拡がりやを適当に取れば、デトネーション波は一時通常の火炎伝播に変わるものと考えられる。

Soloukhin の計算⁷⁾によればデトネーションが減衰する場合の誘導時間は、減衰しない場合の10倍程度となり、また相隣る二つのトランスバースウェーブ間の距離もほぼ減衰しない場合の10倍程度となる。彼らの実験によると、管路の拡大によるデトネーション波の中断の場合、その限界条件では、アセチレン・酸素の等モル混合ガスに対して、円管ではトランスバースウェーブの数は13個、平滑管では10個という値を得ている。すなわち、トランスバースウェーブの数がこの限界値より多ければデトネーションの中断は起こらないといえる。

3. 実 験

デトネーションの中断条件を量的に表現するために膨張を二次元に取って実験を行なった。すなわち、二次元形状のデトネーションチューブを用い、アセチレン・酸素混合ガスについて、管路の拡大比、ガス組成、初圧を変えることによってデトネーションの中断条件について検討した。

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。用いたデトネーションチューブは、厚さ 1cm の透明なアクリル板二枚を内部の空間のすきまの厚さが 3mm になるように真ちゅう板を介して接着、ボルト締めしたものである。全体の長さは 100cm (ドライバ部 50cm, 膨張部 50cm), 膨張部の幅 A を一定 (100mm) にして、ドラ

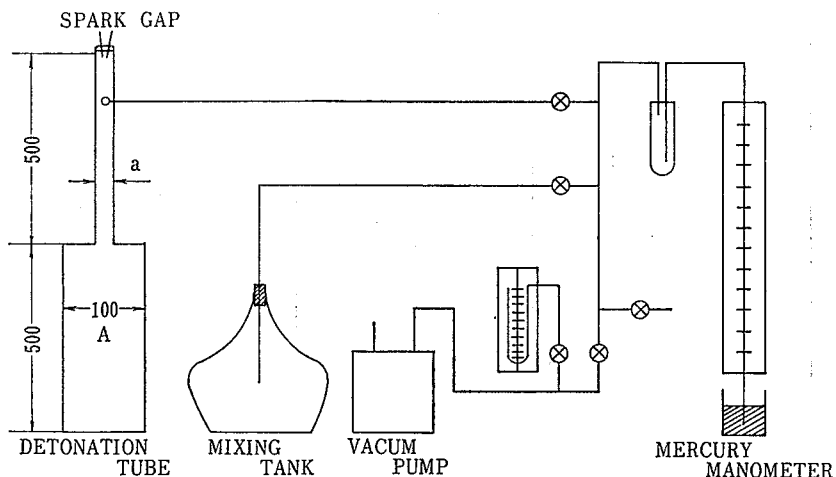


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus.
実験装置の概略

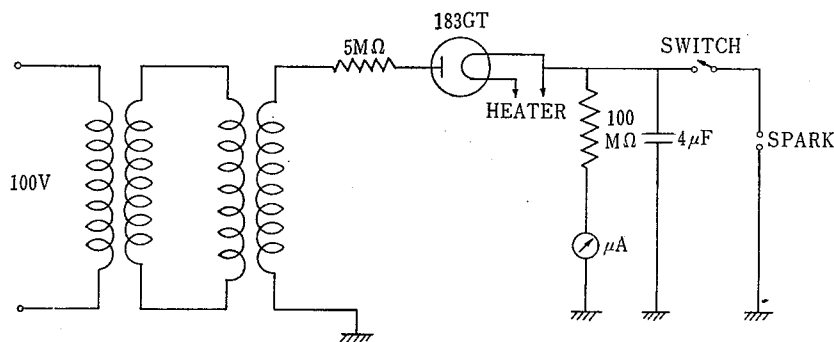


Fig.2 Electric spark circuit.
電気スパーク回路

イパー部の幅 a を 40, 20, 8, 4mm に変化させた。実験は分圧によってあらかじめ調製した試料ガスを持ち、電気スパークによって、垂直に立てたデトネーションチューブの上端において着火した。着火装置の回路図を Fig.2 に示す。着火源の強さは 3kV, 4 μ F である。スパークによって発生したデトネーション波の伝播の様子を暗室においてシャッター開放の静止写真を用いて撮影し、デトネーションが膨張によって中断し再転移するまでの中断距離、および、もはやデトネーションの中断が起こらなくなる初圧を測定した。また、別に回転ドラムカメラ (Fig.3)、および一部の試験ではイオンプローブによって火炎速度変化を測定した。イオンプローブの回路、およびイオンプローブの構造の概略を Fig.4 に示す。回転カメラによる流し写真は回転ドラムに巻いたフィルム (ネオパン SSS) を火炎の伝播方向に垂直に高速で回転させることにより、火炎の自発光を距離—時間の関係に記録するものである。火炎速度は、フィルム面上の物体の縮小率を

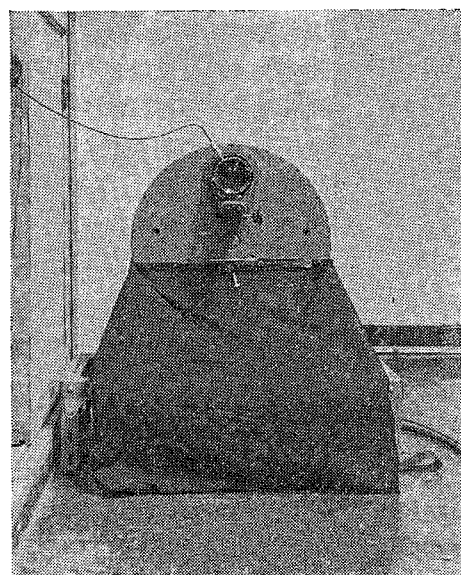


Fig.3 Rotary drum camera.
回転ドラムカメラ

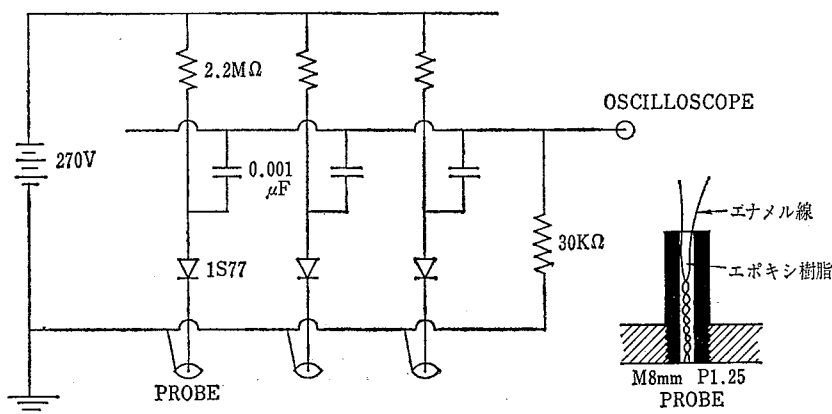


Fig.4 Ionprobe circuit and the structure of the probe.

イオンプローブ回路とイオンプローブの構造

m , フィルム面上の像の角度を θ , 回転カメラのドラム周長を l , ドラム回転数を r/sec とすると

$$\text{火炎速度 } D = mlr \tan \theta$$

となる。

イオンプローブによる方法は、イオンギャップにあらかじめ電圧をかけておき、そこへ火炎がくるとイオン電流が流れる。これをオシロスコープでパルスとして記録するもので、プローブとプローブの間の平均火炎速度が求まる。

4. 結果および考察

シャッター開放の静止写真からアセチレン・酸素の種々混合割合 ($100x\text{C}_2\text{H}_2 / (x\text{C}_2\text{H}_2 + y\text{O}_2) = 20.0, 28.6, 40.0, 50.0, 60.0\%$) について拡大比 $R (R=A/a = 2.5, 5.0, 12.5, 25.0)$ を変えた場合の初圧と、デトネーションがいったん中断して再び転移が起こるまでのデトネーション中断距離との関係を求めた。その例を Fig.5 に、結果を Fig.6 に示す。

Fig.5 に見られるように、二次元形状の容器中でアセチレン・酸素系の混合ガスのデトネーション波をシャッター開放の静止写真に撮ると菱形模様が観測される。これは低圧のデトネーションにおいて顕著に見られる。この菱形模様は斜め方向へ進む反応波で、トランスバースウェーブ (Transverse Wave) と呼ばれる。この部分はとくに反応が激しいため高温、高压である。デトネーション波が周期的に集束 (Converging), 発散 (Diverging) を繰り返しながら進む結果、この反応点の軌跡が模様として観測されるわけで、これはデトネーション波の構造が定常一次元ではなく、微視的

には非定常で三次元の構造を持っていることを示唆している⁸⁾。菱形模様の大きさは初圧が高くなると小さくなる。デトネーションへの転移がどの位置で起こったか、またはデトネーション波が安定であるかどうかは、この模様の生成した位置と模様の規則性を観察すれば写真から判定することができる。また、初圧が高くて模様が微細な場合でも、転移直後はオーバードライブ (Over drive または Over shoot) のために強く発光するのでどこでデトネーションへ転移したかは容易に判定しうる。

この結果から、一定のガス組成と拡大比においては、初圧を次第に上げていくと初圧に応じて初圧が低い間はデトネーションが完全に中断して膨張部での再転移が見られない状態がしばらく続く。これはデトネーションが中断していったん通常の火炎となり、再びデトネーションへ転移するまでの中断距離 (一般には爆轟誘導距離という) が装置の膨張部の長さ 50cm より大きい事を示している。さらに、初圧を上げていくと膨張部での再転移が起こるようになる。この中断距離は初圧の上昇とともに次第に短くなり、ある圧力で急に中断が起こらなくなる。この時の初圧を中断開始圧力と定義した。Fig.6 では中断が起こらない場合は中断距離を零としてプロットした。中断開始圧力は拡大比が大きくなるほど高くなり、ガス組成によって著しく異なる。この結果を Fig.7 に示す。ここで各ガス組成について中断開始圧力と拡大比の関係を求めるために両方の対数を取ってプロットしたものが Fig.8 である。この図より、中断開始圧力は各ガス組成に共通して拡大比の 0.6~0.7 乗に比例している。すなわち

$$P_{\text{decay}} = K \cdot R^n \quad n = 0.6 \sim 0.7, R = A/a$$

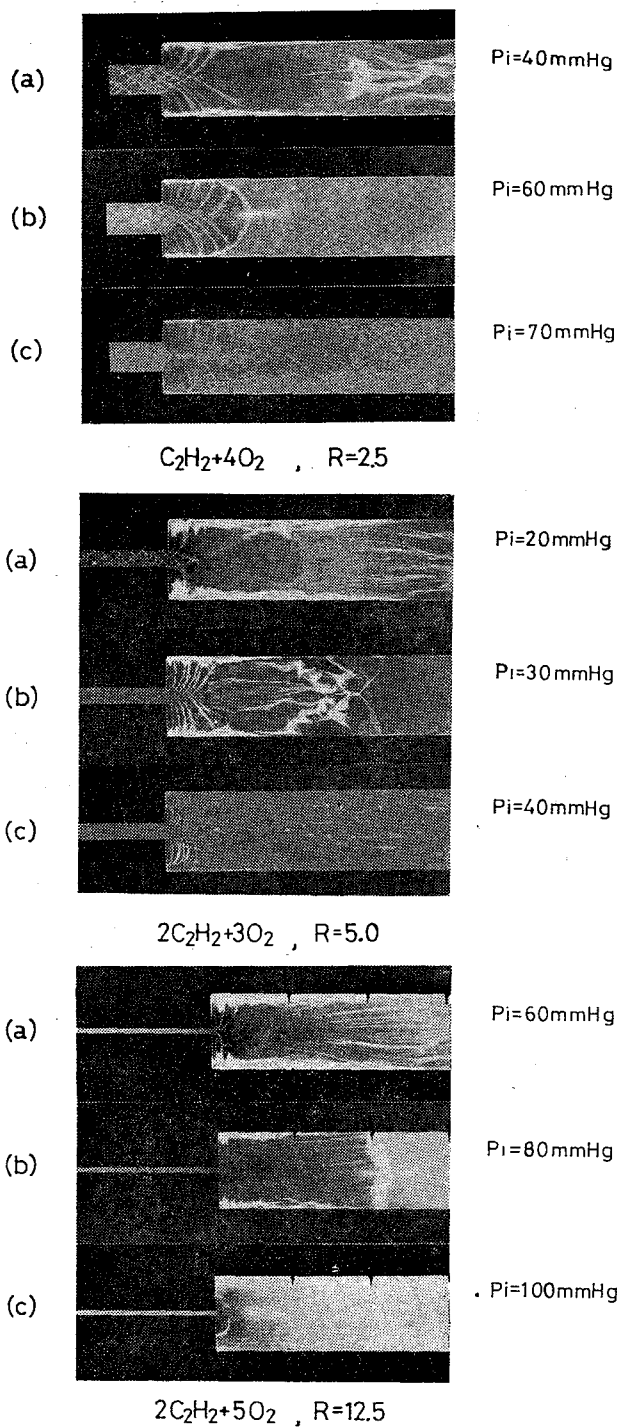


Fig. 5 Still photographs of detonation expansion.
 気体爆轟波膨張時の静止写真
 (a) detonation decayed, 中断
 (b) detonation re-established, 再転移
 (c) detonation not-decayed, 中断せず

と表わせる。 K は中断の難易を示すもので、アセチレン・酸素系では等モル組成 $[\text{C}_2\text{H}_2+\text{O}_2]$ の場合が最も中断しにくく、これより低アセチレン濃度側へは徐々に中断しやすくなるが、等モルより高アセチレン濃度になると急激に中断しやすくなる。アセチレン70%濃度では、ガスの着火が困難であったためデータを得ることができなかった。 K の値をアセチレン濃度別にプ

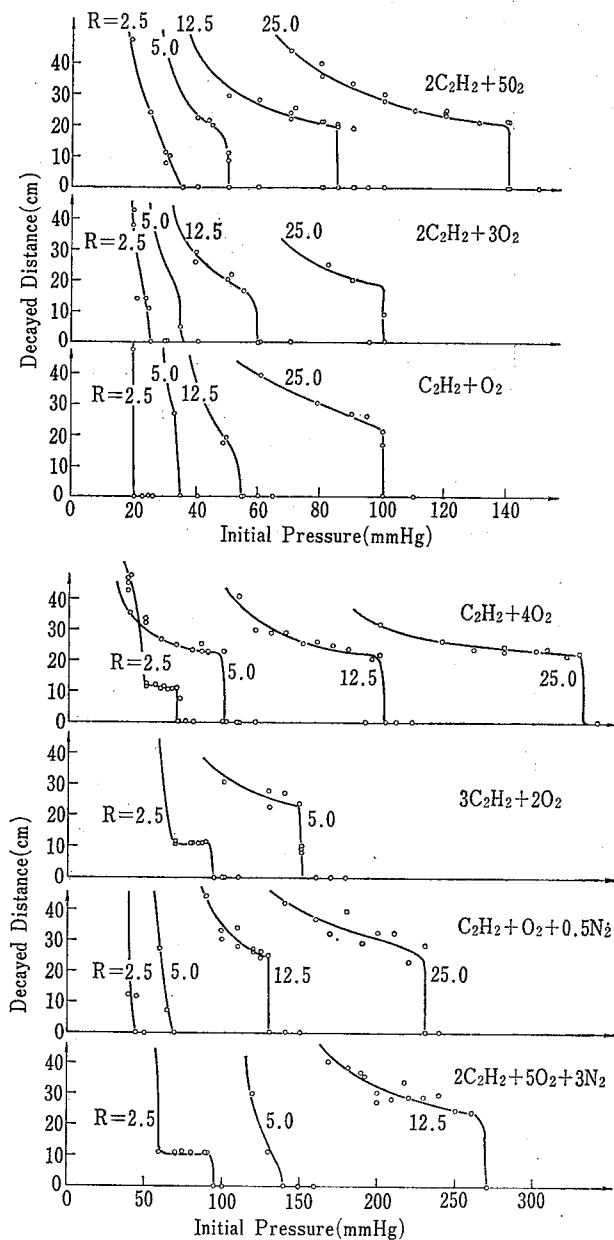


Fig. 6 Variation of detonation decayed distance with initial pressure at different expansion ratios for various $\text{C}_2\text{H}_2\sim\text{O}_2$ or $\text{C}_2\text{H}_2\sim\text{O}_2\sim\text{N}_2$ mixtures.
 種々拡大比、ガス組成における初圧と中断距離の関係

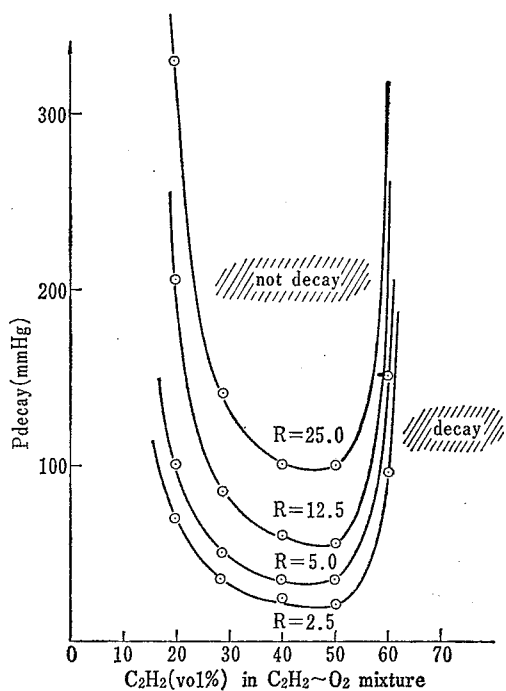


Fig. 7 Variation of limiting pressure of decay with various $C_2H_2 \sim O_2$ mixtures at different expansion ratios.
アセチレン濃度と中断開始圧力の関係

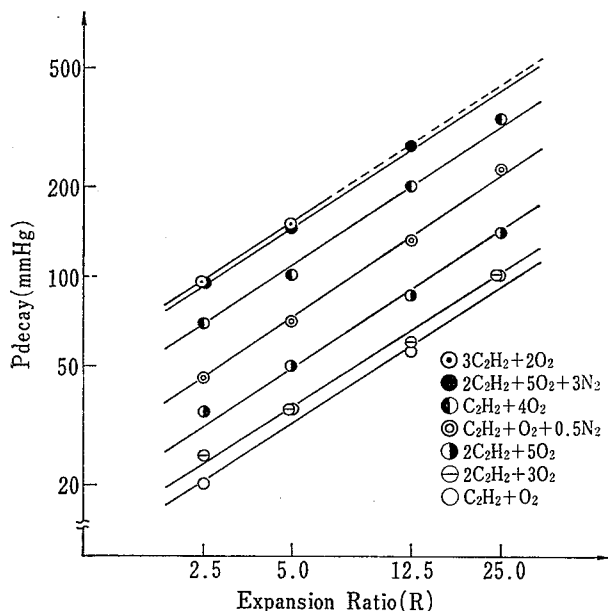


Fig. 8 Limiting pressure of decay with expansion ratio at various gas mixtures (logarithmic plot).

拡大比と中断開始圧力の関係

ロットしたのが Fig. 9 である。この中断の難易の順序は必ずしも爆速の順序とは一致しない。(Fig. 14 参照)
ここで最も中断しにくいアセチレン・酸素の等モル

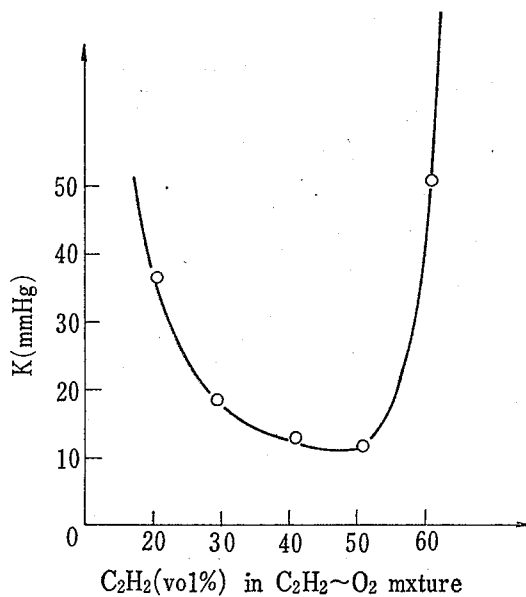


Fig. 9 Variation of K with acetylene percentage.

K とアセチレン濃度の関係

組成の混合ガスに窒素を20%添加して同様の実験を行なったところ、 K の値が2倍ほど増し(11.8→25.1)中断しやすくなった。このことから、空気との混合ガスの場合なら大気圧以上でも容易に中断し得ることが推定できる。一方、アセチレン・酸素の化学量論組成の混合ガス $[2C_2H_2+5O_2]$ に稀釈ガスとして酸素と窒素を加えた場合の影響を比較してみた。実験は $[C_2H_2+4O_2]$ すなわち $[2C_2H_2+5O_2+3O_2]$ 組成と $[2C_2H_2+5O_2+3N_2]$ 組成について行なった。その結果、 K の値は前者が36.3、後者が47.3であった。つまり、稀釈ガスとしての効果は過剰の酸素より窒素の方が大きいといえる。

次に火炎速度の変化についてイオンプローブを用いて測定した結果を示す。用いたイオンプローブは7個で、点火側より順次(1), (2), ……(7)の番号を付す。イオンプローブ(1)はシンクロスコープのトリガー用である。イオンプローブの間隔は(3)~(4)の間が5.0cmで、他はすべて3.0cmである(Fig. 10)。得られる火炎速度値は各プローブ間の平均火炎

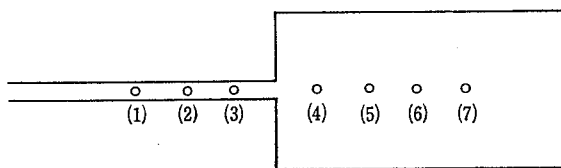
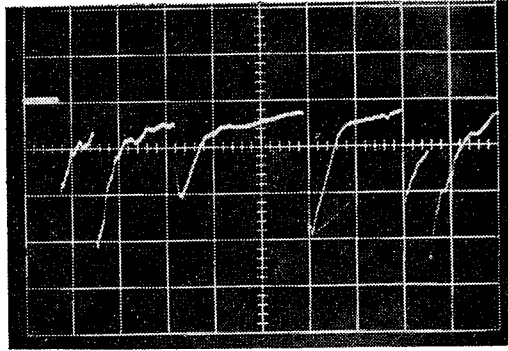


Fig. 10 Arrangement of the ionprobes.
イオンプローブの配置



$2C_2H_2+5O_2, R=12.5$

$P_i=80\text{mmHg}$

$20\mu\text{sec/div}$

Fig. 11 A oscilloscopic record by ionprobe method.
イオンプローブによるオシロスコープの波形

Table 1 The variation of flame velocity at various initial pressures by ionprobe method
イオンプローブによる火炎速度変化の測定値

P_i mmHg	D(2-3) m/sec	D(3-4) m/sec	D(4-5) m/sec	D(5-6) m/sec	D(6-7) m/sec	D, D, D cm
50	1996	(1457)	430	388	440	38.0
60	2020	(1465)	448	428	535	33.5
70	2068	(1518)	480	734	2856	6.6
80	2040	(1594)	519	1055	2627	6.1
90	2047	(1610)	593	1848	2393	5.7
100	2118	(1895)	2098	2118	2140	0.0

D, D, D: Detonation Decayed Distance
 $2C_2H_2+5O_2, R=12.5$

速度である。Table 1 に $R=12.5, [2C_2H_2+5O_2]$ 組成の混合ガスの場合の火炎速度変化の測定値を示す。D(2-3) と示したのはプローブ (2) と (3) の間の平均火炎速度である。また、シンクロスコープの波形の一例を Fig. 11 に示す。

これらの結果から次のことがいえる。最初、初圧の低い間は、細い管中を定常に伝播していたデトネーション波は急に容積が膨張することによって急速に減衰する。D(2-3) は定常爆速で、D(3-4) は膨張前後 5cm の間の平均爆速である。実際の火炎速度は、膨張後管の幅 (8mm) とほぼ同じ長さを過ぎて急激に減速していることが後に述べる流しカメラによる爆速変化の測定結果から分った。その後、火炎速度は序々に加速を続け、初圧に応じてある点でデトネーションへの再転移が起こる。この時、オーバードライブして爆速は定常な爆速より過大な速度を示す。D(6-7) の一部は、そのために過大な爆速を示している。この時の実際の最大速度は、瞬間的にはさらに大きい値であると思われる。さらに、初圧が高くなるとデトネーションの中断は起こらず、膨張時にやや速度が遅くなる程度で爆

速はほとんど変化しなくなる。この実験で、大まかな爆速の変化の状況を把握できるが、イオンプローブは非連続な測定方法であるため二点間の平均的な火炎速度しか求まらないので、火炎の加速、減速を見るためには連続的な方法が必要となる。また、イオンプローブのわずかの突起がガスの流れの乱れの原因となるため、中断及び中断後の再転移に多少影響する。そのため、中断開始圧力および中断距離がイオンプローブを用いなかった実験値と若干異なる。

次に、回転カメラによる流し写真から爆速の測定を行なった。回転カメラによる流し写真の例を Fig. 12 に示す。これらの写真からも分るように、着火後火炎は初圧に応じてある爆轟誘導距離を進行した後、デトネーションへ転移する。(実験では、早期に安定な爆轟を得るために着火点近くの管路に針金のねじったものを入れ、ガスの流れを乱すことにより点火後ただちに爆轟へ転移するようにしてある。) このデトネーション波は細い管の部分で定常に伝播していくが、管路の中ほどで急に容積が増すため、デトネーションは急速に衰えて通常の火炎になる。この際、爆速はシャッター開放の静止写真の菱形模様からも推定できるように、トランスバースウェーブの衝突がなくなる点、すなわち膨張後、管径にほぼ等しい距離を過ぎると急速にほとんど不連続に減衰する。この時の拡大比と減速率の関係の例を Table 2 に示す。その後火炎は序々に加速を続け、初圧に応じてある中断距離を経て再び爆轟へ再転移する。この直後数センチメートルの間はオーバードライブして一時過大な爆速を示すが、すぐに定常な爆轟波にもどって伝播していく様子を示している。流し写真およびシャッター開放の静

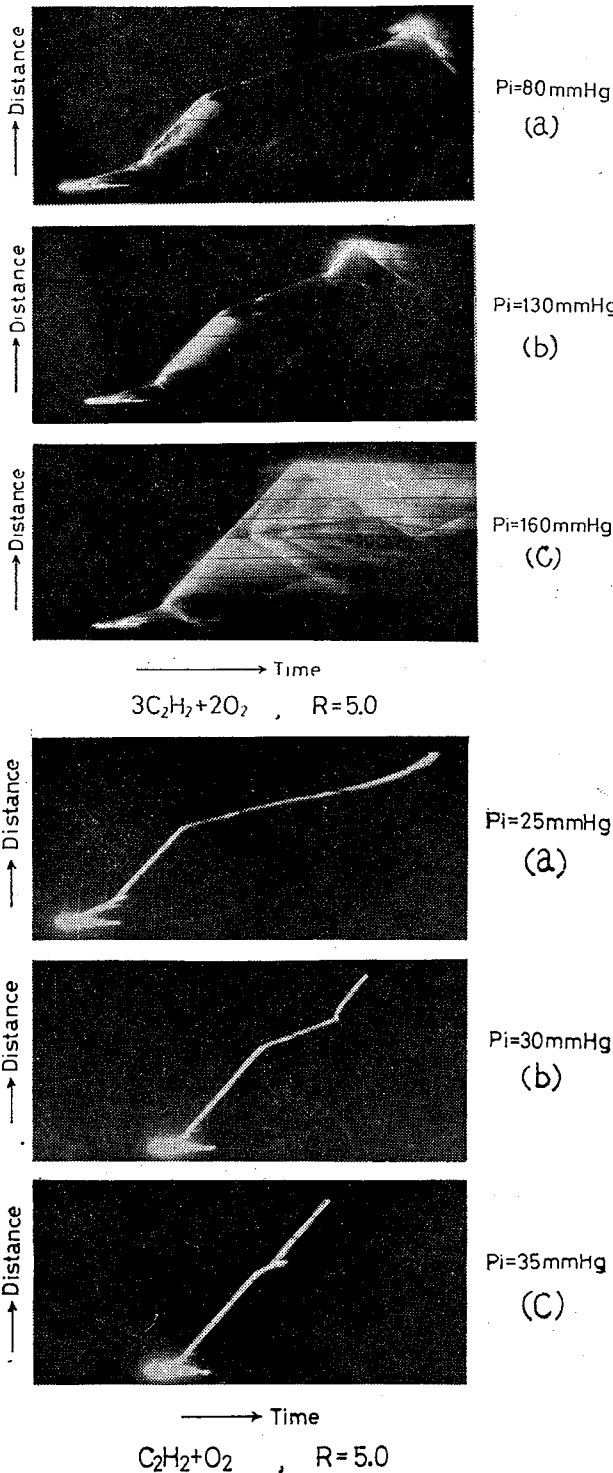


Fig.12 Streak photographs of detonation expansion.

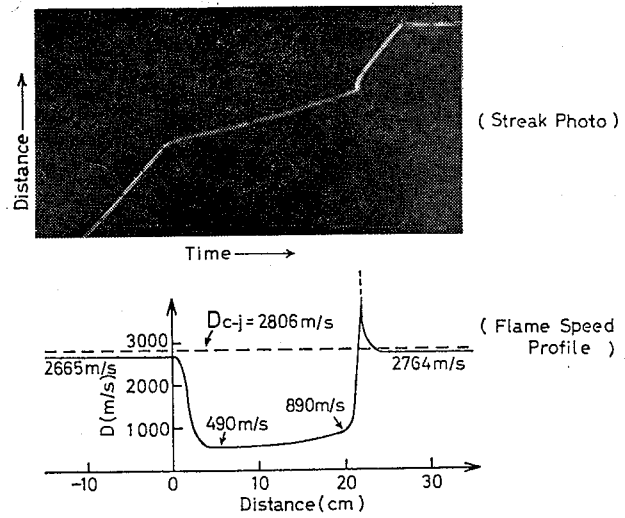
気体爆轟波膨張時の流し写真
 (a) detonation decayed, 中断
 (b) detonation re-established, 再転移
 (c) detonation not-decayed, 中断せず

Table 2 Effect of expansion ratio on the rate of flame velocity decrease.

拡大比と減速率の関係

Expansion ratio R	Flame vel, fore-expand A (m/sec)	Min, flame vel, after-expand B (m/sec)	The rate of vel, decrease $(A-B)/A$	Decayed distance D, D (cm)
2.5	2,385	1,134	0.525	10
5.0	2,366	718	0.695	26
12.5	2,340	379	0.840	>50
25.0	2,330	264	0.885	>50

$3C_2H_2+2O_2$, $P_i=100\text{mmHg}$



$C_2H_2+O_2$, $P_i=100\text{mmHg}$, $R=25.0$

Fig.13 Flame speed profile corresponds with streak and still photographs.

流し写真および静止写真に対応させた火炎速度変化

止写真に対応させた火炎速度変化の例を Fig.13 に示す。

最後に試料ガスの組成および理論爆速との差を検討するために初圧一定 (100mmHg) の時の濃度と爆速の関係を実験値と理論計算値について Fig.14 に示す。この図から分かるように爆速の実験値と理論値はどれも数パーセントの差でよく一致している。このことから、試料ガスの濃度は分圧どおりにできていることが確認された。また、爆速は管幅が小さくなると抵抗が増すために遅くなることが予測されるので爆速の管幅によ

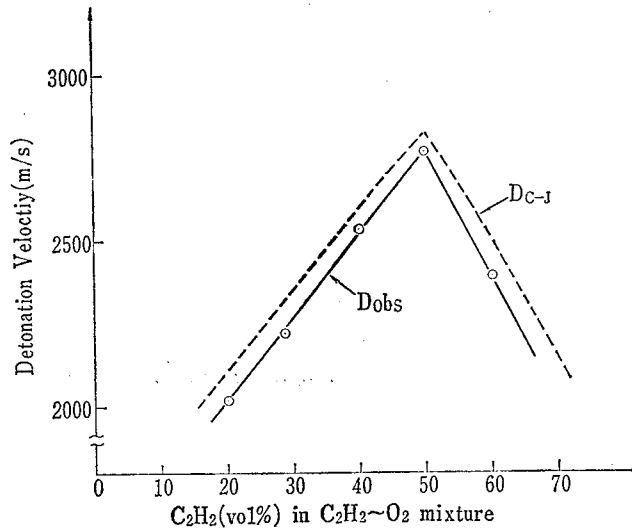


Fig. 14 Calculated (broken line) and observed detonation velocity as a function of acetylene percentage at $P_1=100\text{mmHg}$ in flat channel.

アセチレン濃度と爆速の関係

る影響について検討した。Fig. 15 に管幅 a の逆数に対して爆速を各濃度別にプロットしたものを示す。破線は各濃度における理論爆速値である。この図から爆速は管幅が大きくなると速くなるが、 a を無限大へ外挿しても理論爆速値までにはならない。これは管路が 3mm という二次元の構造であるため、管壁の抵抗が効いているためと思われる。

5. 結 び

以上の結果から管中のデトネーションの中断は、初圧と拡大比を適当に取ってやれば可能であることが分った。試料ガスには最も爆発力の強いアセチレン・酸素混合ガスを用いたが、空気中の他の可燃性ガスのデトネーションにはさらに高い圧力においても有効であることが推定される。実験は二次元構造の管路の場合について行なったものであるが、実際の管路はパイプ状のものがほとんどであるからさらに膨張を三次元にとって実験を行なう必要がある。その場合のほうが膨張の効果は大きくなるので、デトネーションの中断はより容易であろうと思われる。また、同じ拡大比でも規模効果があることも考えられるので、拡大比のみならず管径の絶対値についてもさらに検討する必要がある。

(謝辞)

本実験は東京大学、工学部、燃料工学科、疋田研究室において、疋田教授のご指導によって行なったものである。実験を行なうにあたり、ご指導いただいた疋田教授はじめ疋田研究室の方々、とくに助手の米田氏および大学院生の永石、高井両氏には実験上の技術や有益な討論、助言をいただいたことを深く感謝致します。

(昭和47年2月13日受付)

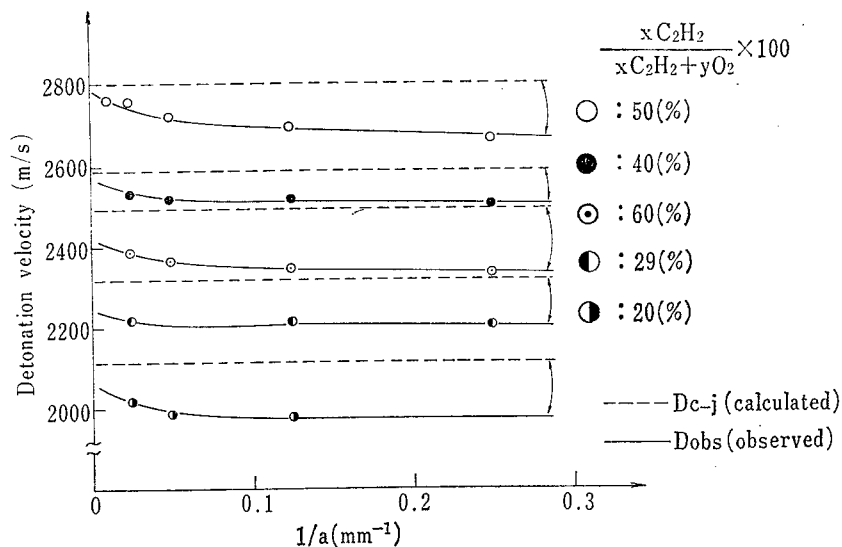


Fig. 15 Dependence of detonation velocity on inverse of channel width at various $C_2H_2 \sim O_2$ mixtures, $P_1=100\text{mmHg}$.

爆速の管幅による影響

文 献

- 1) B. Lewis, G. Von Elve, "Combustion, Flames and Explosion of Gases", (1961), Academic Press, N. Y
- 2) Ia. B. Zeldovich, A. S. Kompaneets, "Theory of Detonation", (1960), Academic Press, N. Y
- 3) 疋田, 日本機械学会誌, 72, (606), 906 (1969)
- 4) P. Laffitte, *Compt. rend.*, 179, 1394 (1924)
- 5) P. A. Cabbage, "Second Symposium on Chemical process Hazards with Special Reference to Plant Design" 29 (1963), The Institution of Chemical Engineers, London
- 6) J. H. T. Wu, AFCASI, V. A. Akinsete, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, January, 23(1967)
- 7) R. I. Soloukhin, 工業火薬, 28, 95 (1967)
- 8) 永石, 米田, 疋田, 工業化学雑誌, 72, 2070 (1970)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-20-5

昭和 47 年 6 月 10 日

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 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108

UDC 662.61 : 534.222

管路の拡大による気体爆轟波の中断 (第1報)

—アセチレン酸素爆轟波について、管路を二次元的に拡大した場合—

松井英憲

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-20-5 (1972)

二次元形状の薄い爆轟波管を用いて、管路を途中で拡大した場合の爆轟波の特性について実験を行った。

アセチレン、酸素混合ガスについて、管路の拡大比、初圧、ガス組成を変えることによって、流し写真および静止写真から爆轟中断距離 (一般には爆轟誘導距離)、中断開始圧力および管路拡大後の火炎速度変化を測定した。

(表2, 図15, 参8)



UDC 662.61 : 534.222

Decaying of Gaseous Detonation by Expansion (First Report)

—Experiments in Flat Channels for Oxy-acetylene Detonations—

by H. MATSUI

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety RIIS-RR-20-5 (1972)

Oxy-acetylene gaseous detonation waves were initiated in the flat tubes which were made out of acrylic plates, and enlarged at the halfway.

Streak and still photographs were taken to obtain the detonation decayed distance (induction distance), the limiting initial pressure of decay and variation of the flame velocity after expansion, for various expansion ratios of the tubes and gas compositions.

(2 Tables, 15 Figures, 8 References)

