

エチレンの管内爆発における火炎伝播状況と 火炎温度

勝山邦久*, 大森阿津美*, 加藤真蔵*

エチレン-空気予混合ガスを内径 2.5 cm の爆発管内で燃焼, 爆轟させ, その現象を流シカメラ, シュリーレン高速度カメラで撮影した。また, ナトリウム D 線反転法を応用した高温気体の瞬間温度測定装置を製作し, 燃焼, 過大爆轟, 爆轟での温度を測定した。

1. 緒言

最近, 石油化学コンビナートでは技術の急速な進歩により規模が大型化し, 可燃性物質等が大量に製造, 貯蔵されている。とくにエチレンは石油化学コンビナートの中核物質である。したがって, エチレンの保安のあり方が常に重要な課題となっている。

エチレン等, 可燃性ガスの爆発に関する研究は数多くなされているが, 燃焼, 過大爆轟および定常爆轟における火炎の温度を測定した例は少ない。そこで, 爆発管内に密封したエチレン-空気の予混合ガスに着火した場合, 管内での燃焼, 過大爆轟および定常爆轟の状態をオリフィスの影響のもとで検討した。

2. 実験方法

2.1 シュリーレン高速度写真撮影実験装置

実験に用いた爆発管はステンレス製で内径 2.5 cm, 長さ約 20 m のものである。写真撮影用には断面が 2.5 cm × 2.5 cm で長さ 25 cm の矩形管を接続した。この矩形管は両側に高さ 2.5 cm, 長さ 20 cm の石英の窓を有している。混合ガスは直径約 60 cm, 高さ 1 m の混合槽内で作り, 濃度は干渉計式濃度計で測定した。空気は大気中のもので初気圧はすべて 1 気圧であって初期温度はすべて約 25℃ である。実験は両端密閉とし, 着火は管の側壁に設けたプラグの放電により行った。

Fig. 1 (a) は伝播速度測定とシュリーレン光学系の概念図である。火炎面の伝播速度は浜松テレビ製シリコンフォトセルから NF 回路設計ブロック製ウエーブメモリへ直接接続したためインピーダンスのマッチングが問題になるが, 各測定点間の相対速度は十分測定できるものと思われる。圧力波の場合は共和電業製エ

ンジン指圧計および Kistler 製石英式圧力計を別々に使用した。エンジン指圧計では圧力波の伝播速度を測定した場合には共和電業製動ひずみ計と新興通信工業製の動ひずみ計を用いた。これらの応答周波数は, それぞれ 2 KHz および 50 KHz であって追従性を考えると応答周波数が問題となるが各ひずみ計で測定した測定点間での相対速度は測定出来るものと思われる。

高速度写真撮影のためのシュリーレン光学系は口径 6 cm, 焦点距離 60 cm のレンズ式のものを用いた。光源およびドラムカメラは菅原研究所製のものであって, クセノンの閃光時間は 0.5 ~ 1 μs, 閃光周波数 1 Hz ~ 75 KHz, 放電管入力 は 1 ~ 5 ジュール/パルスである。ドラムカメラは直径 400 mm, 回転数は 0 ~ 500 r.p.m である。

2.2 瞬間火炎温度測定装置

今回用いた火炎温度の瞬間測定装置について, その原理および装置についての概略を述べる¹⁾²⁾³⁾。スペクトル線反転法は火炎の温度測定によく用いられる方法であって, NaD (5890 Å) のスペクトル線が標準光源の連続スペクトルに対し発光も吸収もしないように標準光源の輝度温度を調節すると, そのときの光源の輝度温度は気体の温度に等しいという原理に基づいている。しかし, この方法では応答時間の短い測定を行うことは不可能である。そこで, 標準温度の輝度温度を固定し, ナトリウム原子を含む気体の発光と吸収の強さを同時に測定し, 標準光源の輝度温度と気体の反転温度との差を知る方法を用いた。

いま, 気体から発する NaD 線を分光器で測定すると分光器の出口スリットから得られる光の強さは,

$$I_g = E_\lambda \cdot B(\lambda, T_g) \Delta\lambda \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta S / 2\pi \quad (1)$$

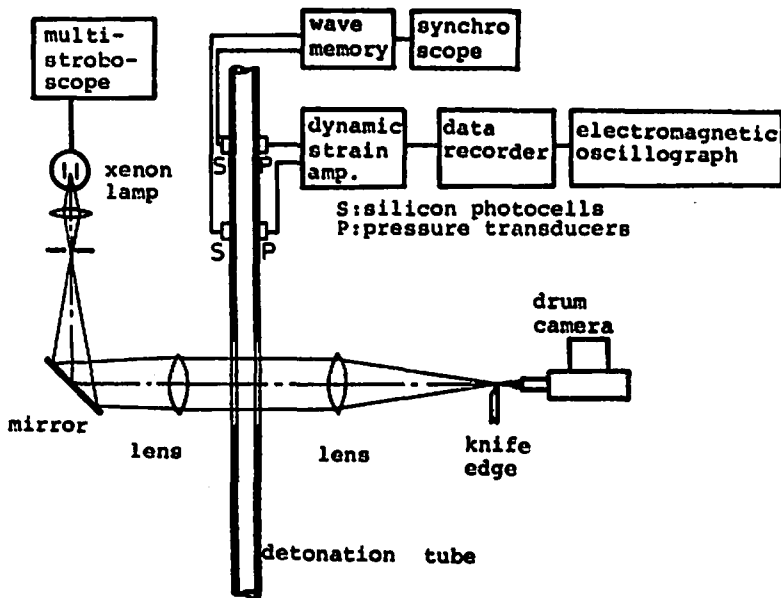
となる。ただし, E_λ は有限な分解能を有する分光器で測定した時の見かけ上の輻射能, $B(\lambda, T_g)$ は気体温度 T_g と等温度の黒体の単位面積, 立体角 2π あ

昭和56年3月11日受理

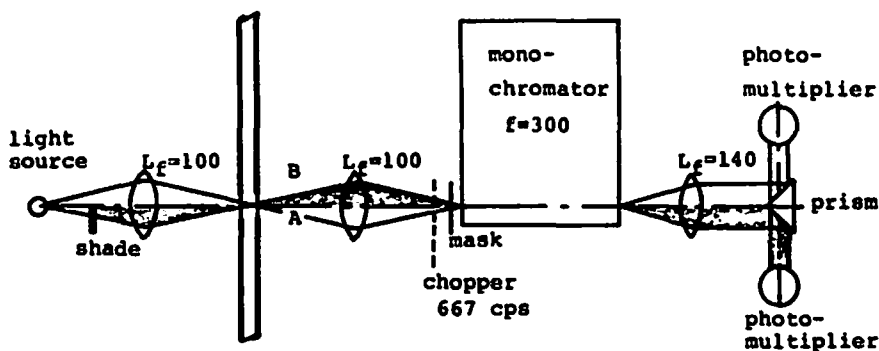
*公害資源研究所 資源第4部第4課

〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-3

TEL



(a) Stroboscopic high speed schlieren photography



(b) Optical temperature measurement system

Fig. 1 Experimental apparatus

りに放出する光束, $\Delta\lambda$ は分光器のスペクトルースリット幅で, $\Delta\Omega$ は分光器に入射する光の立体角, ΔS はスリットの面積である。

一方, 気体を通して来る輝度温度 T_0 の標準光源からの光は, 気体の吸収と輻射をとめない, その強度は

$$I_1 = \{E_1 \cdot B(\lambda, T_g) + (1 - E_1) \cdot B(\lambda, T_0)\} \times \Delta\lambda \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta S / 2\pi \quad (2)$$

である。

また, 標準光源のみからの光の強度は

$$I_0 = B(\lambda, T_0) \Delta\lambda \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta S / 2\pi \quad (3)$$

である。(1), (2), (3)式より

$$\frac{I_1 - I_0}{I_g} = 1 \frac{B(\lambda, T_0)}{B(\lambda, T_g)} \quad (4)$$

が得られる。Wien の式が使える条件では,

$$\frac{1}{T_g} = \frac{1}{T_0} + \frac{k\lambda}{hC} \ln \left(1 - \frac{I_1 - I_0}{I_g} \right) \quad (5)$$

となる。ここで, k は Boltzmann 定数, h は Planck 定数, C は光の速度である。

(5)式の I_1 , I_0 , I_g を光電子倍增管により検出する装置を Fig.1(b)に示す。光源からの光束を2つに分け, 光束 B を遮へい板により遮へいし, 片方の光束 A はそのまま測定点を通過させる。したがって, 火炎が

測定点を通過した場合には B では火炎からの発光のみが測定される。 A では火炎の温度が輝度温度 T_0 よりも小さい場合には吸収となって測定される。両光束は NaD 線 ($5890 \text{ \AA}$) に合わせたモノクロメータを通り、 A, B の光のそれぞれの強度 ($I_1 - I_0$)、 I_0 は 2 個の光源の光電子倍增管で検出され、ウェーブメモリ、シンクロスコープで測定できる。製作したこの装置の応答速度は 100 KHz である。

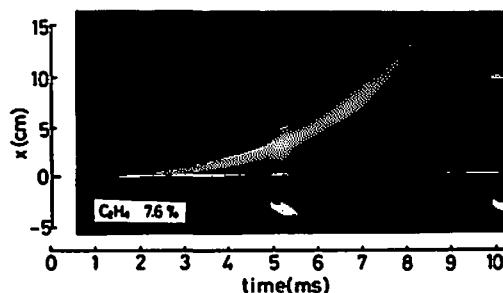


Fig. 2 Flame near the ignition plug obtained by a streak camera

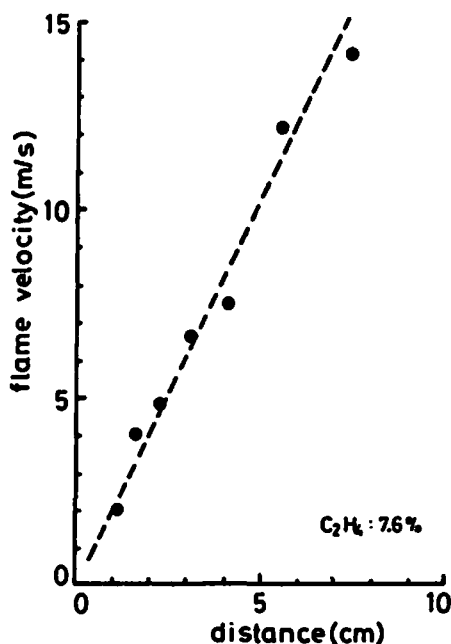


Fig. 3 Flame velocity near the ignition plug

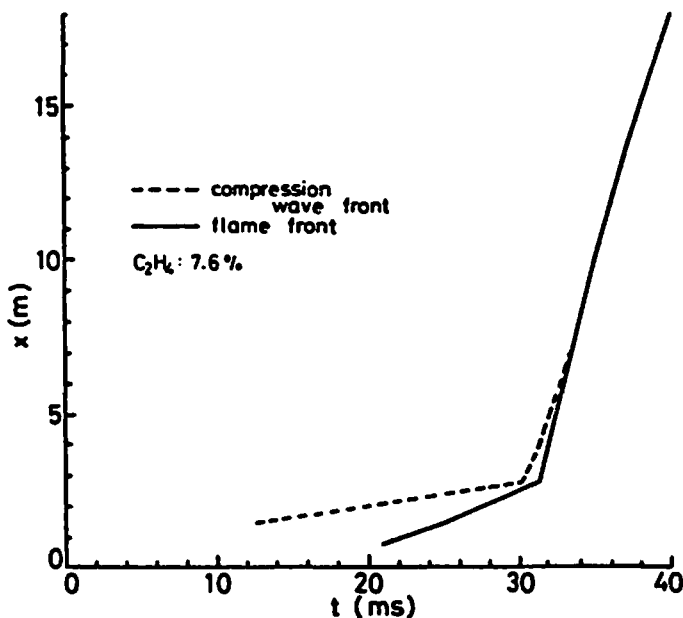


Fig. 4 $x-t$ diagrams of compression wave front and flame front

3. オリフィスが無い場合の実験結果

まず、オリフィス等障害物を設けない場合、今回使用した爆発管内ではエチレン-空気予混合ガスはどのような燃焼の状況を示すのかを検討する。

Fig. 2 は、着火源近傍の火炎をドラムカメラで直接

流し写真法で撮影した写真の一例である。この時のドラムカメラの回転数は 1 分間に 200 回である。縦軸は着火源からの距離 x 、横軸は点火してから時間 t である。着火用プラグに通電した瞬間にストロボが発光し、その後 5 ms 間隔で発光するようにし、フィルム

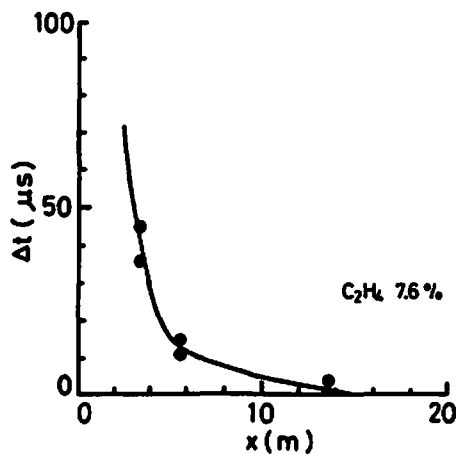


Fig. 5 Difference of time between shock wave front

上に正確な時間が現われるようにした。

最初の頃は x の正負の両方向とも火炎面は着火源から等距離にあるが、 $t=4\text{ms}$ 頃で x の正負で火炎面は対称でなくなるため、負側の火炎は管端の影響を受け始めているのがわかる。この場合着火源近くの管端は $x=-15\text{cm}$ の位置にある。Fig. 2 より火炎速度を求めて示したのが Fig. 3 である。縦軸は火炎速度、横軸は着火源からの距離 x である。着火源近傍では、 x の増加とともに火炎速度は 0m/s から 15m/s 程度まで直線的に増加するのが、Fig. 3 よりわかる。

つぎに爆発管の全長で得た $x-t$ 線図を Fig. 4 に示す。実線はシリコンフォトセルで求めた火炎面の $x-t$ 線図で、点線はエンジン指圧計で求めた圧力波面の $x-t$ 線図である。この場合、爆轟誘導距離は 2.8m である。 $x > 2.8\text{m}$ ではまだ圧力波面と火炎面とが一致していない部分がある。この部分は過大爆轟の部分と思われる。Fig. 5 は、衝撃波面と火炎面との時間差が x とともにどのように変化するかを、定常爆轟近傍で測定して示したものである。この場合の圧力測定には Kistler 製石英式圧力計を使用した。この圧力計の応答周波数は 400kHz までである。Fig. 5 より明らかなように、かなりの距離まで、衝撃波面と火炎面とは一致しない。

4. オリフィスの場合の実験結果

今回の爆発管を用いた場合、ガス濃度によっては爆轟に転移しない場合もある。しかし、オリフィスを爆発管内に設置すると、そのような場合でも爆轟に転移する。

Fig. 6 はオリフィスを着火源から 50cm の位置に設けた場合の火炎の状態をシュリーレン法で撮影した写真の一例である。オリフィスの材質はアクリル酸樹脂

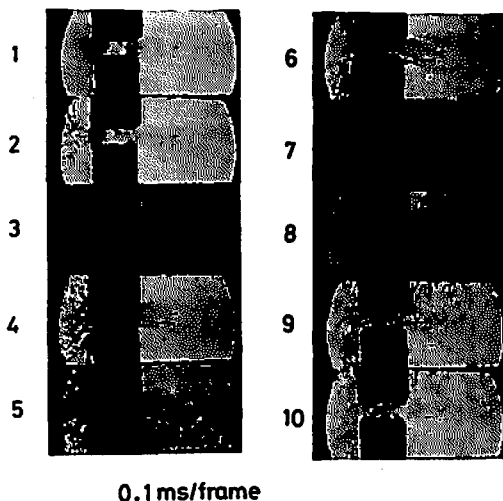


Fig. 6 Stroboscopic high speed schlieren photographs

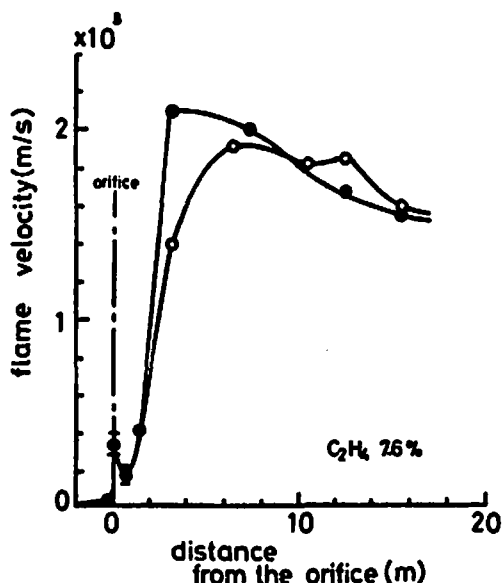
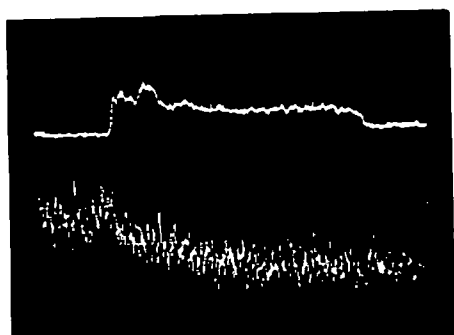


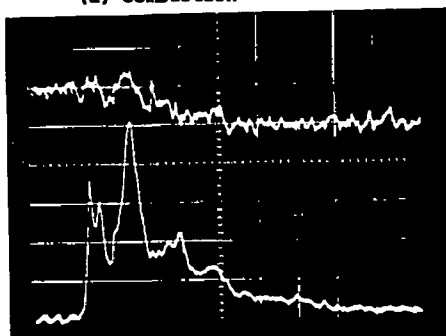
Fig. 7 Flame velocity in the detonation tube with a orifice

であって、孔の部分の大きさは、高さ 5mm 、幅 1cm 、奥行 2.5cm である。1 コマ毎の間隔の時間は 0.1ms である。

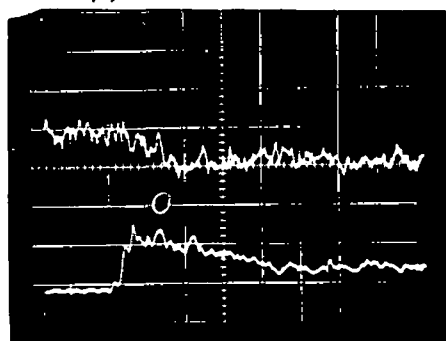
第1コマではまだ火炎はオリフィスには達していない。しかし、オリフィスの入口の部分では暗くなっており、未燃ガスの密度の変化が大きい事がわかる。また、オリフィスの出口では乱れているのが観測される。第2コマで火炎がオリフィス入口に達している。オリフィスの出口側ではまず火炎ジェットのように火炎は



upper: emission
lower: absorption sweep: 2ms/div.
(a) combustion



u : absorption
l : emission sweep: 50μs/div.
(b) over shoot



u : absorption
l : emission sweep: 50μs/div.
(c) detonation

Fig.8 Emission and absorption of NaD line caused by combustion, over shoot and detonation of ethylene-air gas mixture

伝播し、第7コマ頃から上下の壁面近くのガスが燃焼を始める。

オリフィスによって火炎速度がどのように変化するかを示したのがFig.7である。縦軸は火炎速度、横軸はオリフィスからの距離である。オリフィスの出口直後の火炎速度は約350m/sで、Fig.6の高速度写真から求めた値とほぼ一致する。オリフィスから約1m離れた所では火炎速度は約180m/sと遅くなり、その後

急速に速くなり、過大爆轟へ転移し、火炎速度は2000m/sとなる。その後オリフィスからの距離とともに遅くなり定常爆轟で1600~1800m/s程度となる。

さて、つぎに火炎の温度測定結果について述べる。まず、濃度が7.6%の予混合ガスに着火した場合に、燃焼、過大爆轟および定常爆轟の状態でのNaD線の発光、吸収を測定した結果をFig.8(a), (b) および(c)にそれぞれ示す。Fig.8(a)の上のビームが発光(I_g)、下のビームが吸収($I_l - I_0$)による出力であって、横軸は2ms/divである。この場合の光源の輝度温度 T_0 は2500°Kである。発光の持続時間は約13ms/sである。オリフィスから60cmの位置で測定し、火炎速度は180.9m/sである。

Fig.8(b)はオリフィスから4.6mの位置で、過大爆轟の測定結果の一例である。上のビームが吸収、下のビームが発光のみである。横軸は50μs/divで、 T_0 は3038°Kである。過大爆轟における発光が大変複雑な時間的变化を示すのが特徴である。

Fig.8(c)はオリフィスより15mの点で測定した定常爆轟の測定結果の一例である。上が吸収、下が発光のみである。横軸は50μs/divであって、 T_0 は3038°Kである。Fig.8(b)と比較すると明らかなように、定常爆轟と過大爆轟では発光において大きな差異があるのがわかる。

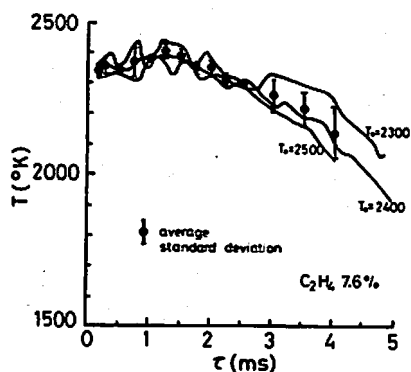
さて、つぎに上記の測定結果等から火炎の温度を求めて、それぞれの場合について示したのがFig.9(a), (b) および(c)である。縦軸には温度、横軸には火炎が測定に達してから時間をとって示した。

Fig.9(a)中3つのデータは同一条件で光源の輝度温度 T_0 のみを変化させて得た結果である。 T_0 は2300°K, 2400°K および2500°Kである。図中に示した各時間の温度の平均値および標準偏差はこれら3つのデータのものである。図より明らかなように、燃焼温度は $\tau = 40\mu s$ で温度が一度減少するのを比較すると興味ある現象であると思われる。

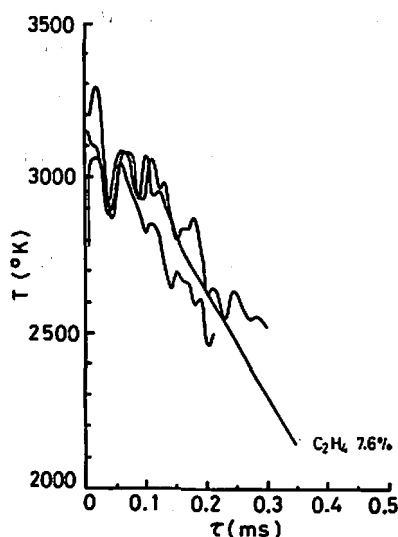
Fig.9(c)は定常爆轟が生じている位置での温度の時間的变化状態である。この場合には衝撃波面と火炎面とは一致している。 $\tau = 0ms$ で $T = 3068^\circ K$ の値を示し、 $\tau = 85\mu s$ で約2800°Kとなるまではかなりの傾きで温度は減少し、その後はゆるやかに減少する。

さて、定常爆轟波背後の温度の減衰の仕方を見つめることを目的として、爆轟波背後の希薄波を考慮してKistiakowskyらによって導かれた式によって温度の計算をし⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、Fig.9(c)に破線で示した。なお、Kistiakowskyらによって導かれた式は、

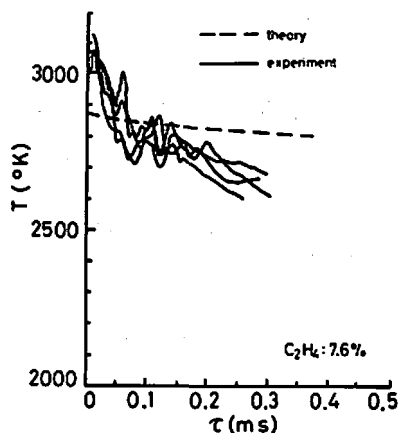
$$\frac{T}{T_0} = D - C_2 \frac{T_2 + 1}{T_2 - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{T_2}{T_0} \right)^{1/2} \right\} \quad (6)$$



(a) combustion



(b) over shoot



(c) detonation

Fig. 9 Measured temperature profiles of combustion, over shoot and detonation waves

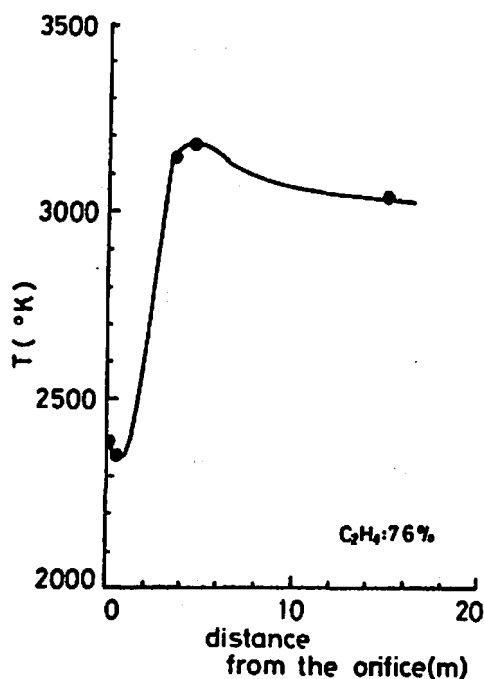


Fig. 10 Relation between temperature and distance from the orifice

であって、管の末端からただちに爆発波が生成するという仮定のもとに導かれている。 D は爆轟速度、 C_2 、 σ_2 、 T_2 はそれぞれC-J爆轟波背後の音速、比熱比、温度である。また、 x は管端から観測点までの距離、 t' は爆発が生じてからの時間、 T_x は位置 x における t' 時間の火炎の温度である。今回は爆轟に転移した位置を Kistiakowskyらが言う管端と仮定して(6)式を用いた。なお、 D 、 C_2 、 σ_2 および T_2 は低圧燃焼に爆轟波のランキンウゴニオの関係式を用いたエンタルピーを計算し、爆速を求め仮定した温度に対して極小となる爆速における爆轟温度等であって、一般的な理論解を得る方法⁹⁾により求めた値を用いた。Fig. 9(c)の実験値および理論値を比較すると、大きな仮定をしたわりには良く一致しているのがわかる。

つぎに、縦軸に温度、横軸にオリフィスからの距離をとって、温度がオリフィスから離れるにしたがってどのように変化するかを示したのがFig. 10である。図にはFig. 9で示した $\tau=0$ msの時の温度を示した。図より明らかなように温度の傾向はFig. 7に示した火炎速度と距離との関係の傾向とよく似ている。また、オリフィス出口から0.5~1m程度離れると2350°Kと温度は低下し、その後過大爆轟、定常爆轟の温度へと変化していくのがわかる。

5. 結 論

エチレン-空気の予混合ガスが内径 2.5cm, 長さ約 20m の爆発管内で燃焼, 爆轟した場合のいくつかの現象について検討した。

まず, 管内に障害としてのオリフィスがない場合について流し写真法で着火源近傍の火炎速度を求めた。着火源から 8cm 程度では火炎速度は 0m/s から 15m/s まで直線的に速くなる。また, 爆発管全長で圧縮波面, 火炎面を検出し, 両方の X-Y 線図を求め, 爆轟誘導距離が 2.8m であることを認めた。また, 衝撃波面と火炎面が一致するのは着火源から 14m 程度であることを認めた。

つぎに着火源から 50cm の位置にオリフィスを設けた場合についてシュリーレン高速度写真撮影を行ない, オリフィス前, 中, 後において火炎の乱れる状態を撮影した。また, 写真より今回用いたオリフィスの出口直後では火炎速度が 300~400m/s となることがわかり, シリコンフォトセルで測定した火炎速度とほぼ一致することを認めた。

さらに, 燃焼, 過大爆轟および定常爆轟における火炎温度を分光的に測定した。燃焼の場合は火炎が到達してから $\tau=1.3\text{ms}$ 程度で火炎温度は最大となり, エ

チレン濃度が 7.6% の時, その値は 2400°K となった。過大爆轟の場合は $\tau=20\mu\text{s}$ で温度は最大となり 3290°K (7.6%エチレン濃度) である。温度の時間的変化状態は非常に複雑である。定常爆轟では $\tau=0\text{ms}$ で火炎温度は最大となり, 値は 3068°K (7.6%エチレン濃度) となった。温度の時間的変化状態は過大爆轟に比較すると複雑ではない。

謝辞 今回用いた火炎温度瞬間測定装置の製作に当り, 東京大学教養学部土屋荘次教授に御指導を受けた。また, 測定に際しても貴重な御指摘を得たので謝意を表する。

文 献

- 1) A. G. Gaydon, I. R. Hurler; 8th International Symposium on Combustion, (1962) p. 309
- 2) 土屋荘次: 日本化学雑誌, 84, 4 (1963)
- 3) 倉谷健治, 土屋荘次: 「衝撃波の化学物理」 p. 106 (昭43) 裳華房
- 4) G. B. Kistiakowsky, F. D. Tabbutt; J. Chem. Phys 30 577 (1957)
- 5) 文献 2)
- 6) 疋田強, 秋田一雄「燃焼概論」 p. 103 (昭46) コロナ社

Flame Propagation and Temperatures Observed in Combustion, Overshoot and Detonation Process of Ethylene-Air Premixed Gases in a Detonation tube

by Kunihisa KATSUYAMA*, Atsumi OMORI* and Shinzo KATO*

Some phenomena about combustion, overshoot and detonation of ethylene-air premixed gases in a detonation tube have been studied. The propagation of pressure wave is measured by engine pressure transducers and quartz pressure transducers. The propagation velocity of flame front is measured by silicon photocells. Flame temperature is measured using the modified NaD line reversal method.

The main results obtained are as follows ;

- 1) The propagation velocity of flame front near a plug is varied from 0~15 m/s linearly.
- 2) The detonation inducing distance is 2.8 m.
- 3) The combustion temperature of ethylene-air premixed gas is $2,320^\circ\text{K}$ at $\tau=0\text{ms}$ and $2,400^\circ\text{K}$ at $\tau=1.3\text{ms}$ respectively. The maximum temperature of detonation is $3,068^\circ\text{K}$ at $\tau=0\text{ms}$.

(*National Research Institute for Pollution and Resources, MITI)