

### 定容分割燃烧室における火炎伝播の実験的研究

島田, 光男 / SHIMADA, Mitsuo / ABE, Kazutoshi /  
YAMAGUCHI, Shuji / OKAJIMA, Satoshi / NAKAHARA, Toshihiko  
/ 中原, 俊彦 / 岡島, 敏 / 山口, 修次 / 阿部, 和利

---

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部  
研究集報

(巻 / Volume)

15

(開始ページ / Start Page)

19

(終了ページ / End Page)

31

(発行年 / Year)

1979-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004166>

# 定容分割燃焼室における火炎伝播の実験的研究

中原俊彦\*・岡島敏\*\*・山口修次\*\*  
阿部和利\*\*・島田光男\*\*

## Experimental Study of Flame Propagation in a Divided Combustion Vessel

T. Nakahara, S. Okajima, S. Yamaguchi, K. Abe and M. Shimada

### Abstract

The authors have conducted experiments to elucidate the complex phenomena of flame propagation and the principal factors influencing the flame movement in a divided combustion vessel. The behavior of the flame propagation is observed by taking the schlieren photographs with the 16-mm high speed camera and by measuring the momentary change of the pressure and the ionization current. The experimental factors employed here are the spark position, throat diameter, subchamber volume and equivalence ratio of propane-air mixture.

The important suggestion is given that in a certain throat diameter the transient phenomenon of quenching takes place when the flame passes through the throat, and consequently the total burning time considerably increases.

### 1. 緒 言

火花点火機関において、燃料の節約と大気汚染防止の立場から、希薄燃焼は有効な燃焼方式とされているが、一方では混合気の点火性の悪化、燃焼速度の低下およびサイクル毎の燃焼変動の増大などに起因する数々の悪条件を備えており、多くの改善が必要とされている。その改善策のひとつとして、希薄混合気を使用する機関に副燃焼室を設けるなどの改良を施して、有害燃焼生成物の排出を増大させることなく、サイクル毎のトルク変動の低下および希薄運転限界の拡大などを図った例がある<sup>1)</sup>。しかし、燃焼を支配する火炎伝播過程についてはいまだに不明確な点が多いため、現象の理解に先立って推測せざるを得ない事柄が数少なくない。

一方、燃焼室内の火炎伝播に及ぼす点火位置および燃焼室の形状などの影響が著しいことは、かなり以前から明らかにされている<sup>2)</sup>。しかし、分割燃焼室に関する限り、その火炎伝播の機構を把握するには数多くの困難を克服する必要があり、いままでにそれに影響する因子を個々に調

---

\* 大学院機械工学専攻

\*\* 機械工学科

べた研究は、ほとんど見当らない。

このような観点に立って、本研究では、定容分割燃焼室内の均一混合気中を伝播する火炎について、点火位置、通路の直径、副室容積および混合比を変えて実験を行い、火炎伝播過程に及ぼすこれらの因子の影響を調べた。

## 2. 実験装置および方法

実験に用いた燃焼容器を図1に示す。容器はジュラルミン製で、両端には観察用のガラス窓がある。燃焼室を主室と副室に分割する厚さ7mmの隔壁の中央には、長さ9mm、内径 $D_t=4.00, 6.00, 8.15$ および $12.55$ mmのいずれかの通路が取り付けられている。主室は長さ $L_m$ と高さがともに80mm、幅33mmの直方体で、内容積は $207\text{ cm}^3$ である。副室は、幅が主室と同じ33mmで、長さ $L_s$ と高さは同時に20, 30および40mmのいずれかに変えられるようになっていて、内容積 $V_s$ はそれぞれ12.3, 28.5および $50.8\text{ cm}^3$ である。

点火用火花電極の位置は通路の中心軸上で任意に変えることができ、この位置と隔壁面の距離を主室側では $X_m$ 、副室側では $X_s$ で表わす。この電極は直径約1mmの鋼線で、1.0mmの火花間隙を構成する。

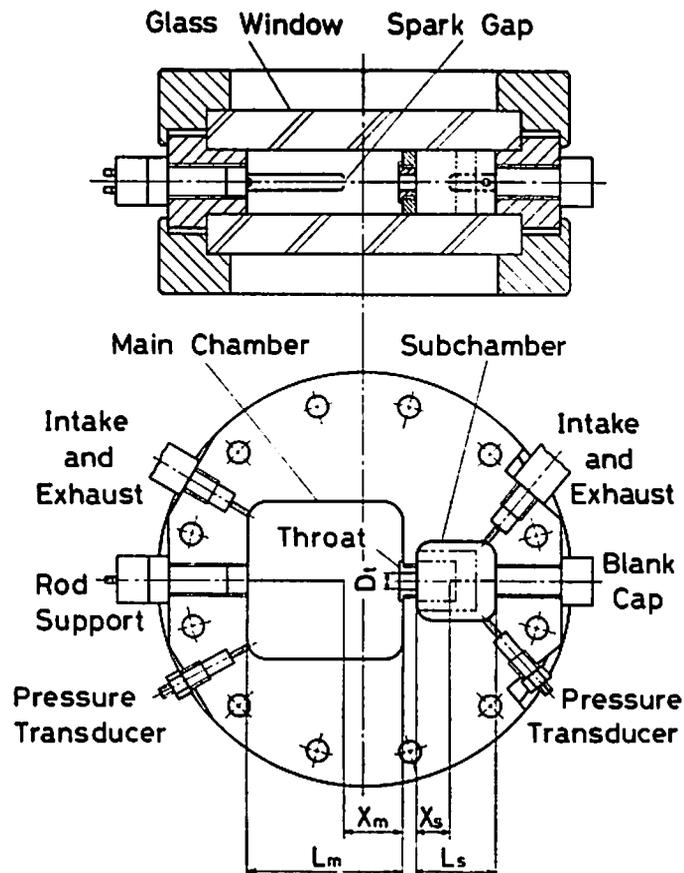


Fig. 1. Combustion vessel.

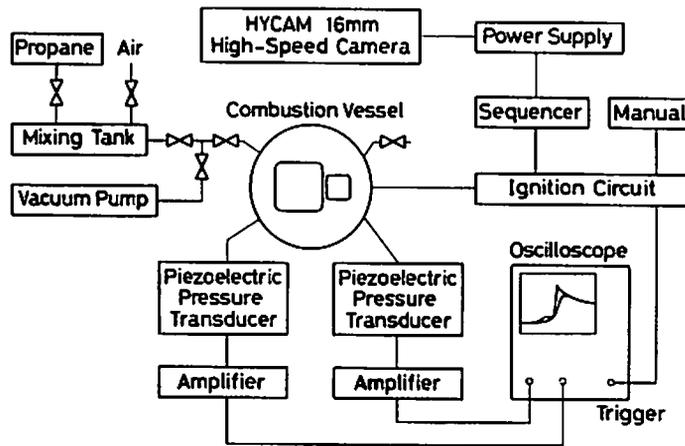


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

装置全体の概要を図2に示す。燃料のプロパン（純度99.9%）は混合容器内で所定の濃度に空気と混合させたのち真空にされた燃焼容器に充填される。そして容器内の混合気が静止するに十分な時間が経過したのちに、シーケンサーによって16-mm高速度カメラが起動され、その撮影速度が毎秒約4000駒に達すると、電流遮断方式の点火回路で混合気が点火される。火炎伝播の観察は、シュリーレン法で行われる。燃焼室の圧力は、主室副室各々に取り付けられたピエゾ型圧力変換器を介して、オシロスコープによって記録され、同一条件で20回程度測定される。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 副室内点火

##### 3.1.1. 火炎伝播過程

副室内で点火した場合の火炎のシュリーレン写真と、同時に記録した圧力線図の代表例を図3に示す。

点火が通路の近傍で行われる場合 ( $X_s=1\text{ mm}$ ) は、副室からの燃焼ガスの弱い吹き出しのために、主室内の火炎の一部は乱されて微弱な乱流火炎構造を呈す。点火位置が隔壁からやや離れる ( $X_s=11\text{ mm}$ ) と、主室では終始、全体に比較的大きな皺の寄った弱い乱流火炎が伝播するため、 $X_s=1\text{ mm}$  の場合より火炎伝播は早く終了する。

$X_s=16\text{ mm}$  では、点火から6 ms程度で主室内にまず微細構造を持った火炎が現われ、ついで10 ms程度で副室内の火炎伝播が促進されると再び14 ms程度で主室へ向う噴流が生じる。しかし、その後は主室の通路側の隅に残った未燃部の燃焼に時間を要するため、点火から火炎伝播終了までの時間は  $X_s=11\text{ mm}$  の場合より長くなる。この場合、最高圧力が著しく低いのは、主に、噴流が繰り返し起こることと、火炎伝播時間が長くなることによって、燃焼ガスの熱損失が増大したためと考えられる。

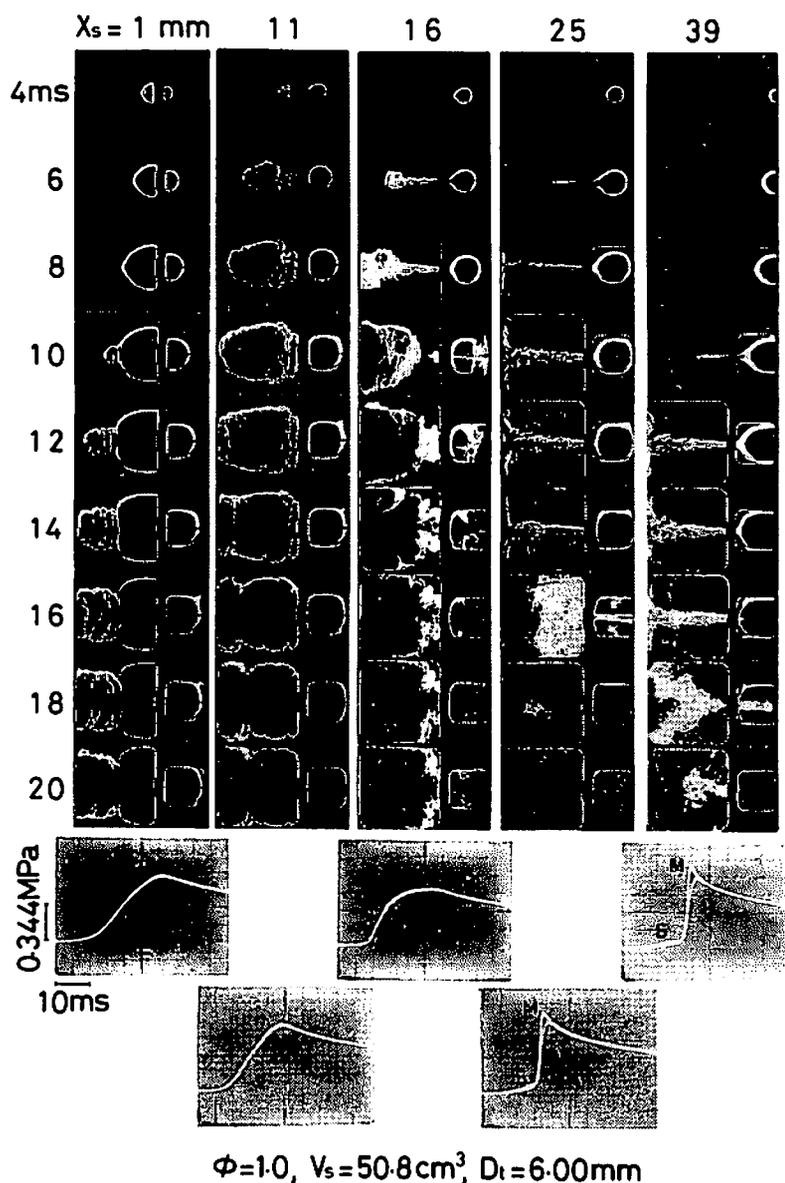


Fig. 3. Simultaneous records of schlieren photographs of flames and pressure traces corresponding to the different spark positions in a subchamber. The time is measured from the spark discharge ; S and M indicate pressures in a subchamber and in a main chamber, respectively.

$X_s=25\text{ mm}$  では、 $6\text{ ms}$  で主室内に噴流を観察できるが、圧力線図に見られるように、主室内の圧力の急激な立ち上がりは約  $15\text{ ms}$  に始まり約  $17\text{ ms}$  で最高圧力に達している。このことは、主室内の主要な火炎伝播開始時刻が少なくとも高温ガスの噴出開始直後ではないことを示唆するが、シュリーレン写真ではこの噴流が火炎か否かの判定はできないので、イオンギャップによる測定を行った。これについては後述する。

$X_s=39\text{ mm}$  でも火炎伝播の経過は  $X_s=25\text{ mm}$  の場合とほぼ同様で、噴出時刻の遅れ分だけ火炎伝播終了時刻が遅れるものと解釈できる。

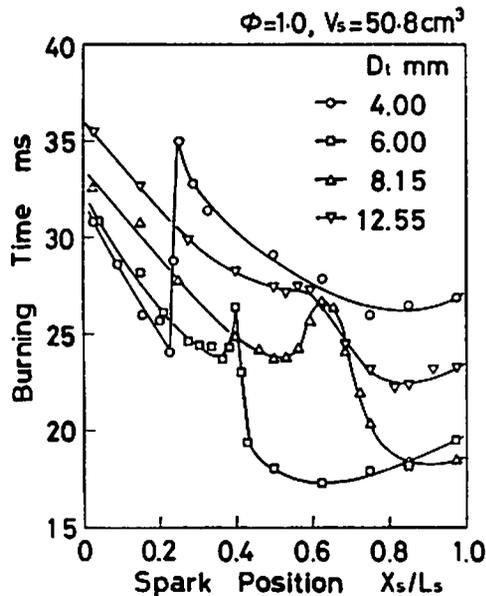


Fig. 4. Change of the burning time with spark position in a subchamber. Parameter : throat diameter.

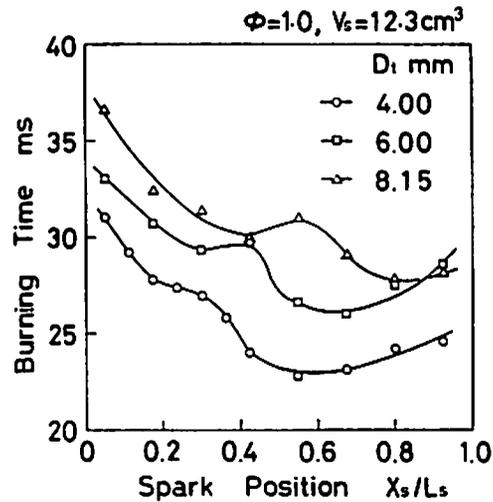


Fig. 5. Change of the burning time with spark position in a subchamber. Parameter : throat diameter.

### 3. 1. 2. 燃焼時間

図3にも見られるように、実験範囲内では、主室内の火炎伝播終了時刻と、主室圧力が最高となる時刻がほぼ一致するので、点火から主室圧力が最高になるまでの時間を“燃焼時間”と定義し、同一条件で約20回記録した圧力線図からそれぞれの燃焼時間を求め、その平均値を図4、5および6に示す。

図4と図5はDtを、図6は当量比φをそれぞれパラメタとして、点火位置(Xs/Ls)と燃焼時間との関係を表わしている。ほとんどの場合、燃焼時間はXs/Lsの増大とともにまず減少し、ついで増加し始めてピークとなったのち再び減少し、最小値を経て再度増加する。この傾向はDt、Vsおよびφの変化には依存しない。図4では通路の直径を変えた場合の燃焼時間の大小関係は、点火位置によって複雑に変化している。しかし、図5では点火位置によらず、おおむね通路の直径が小さい方が燃焼時間は短縮されており、噴流速度の増大が原因と考えられる。これらの3図を総合すると、Dtを変えないでVsおよびφを変えても、燃焼時間のピークが現われるXs/Lsはほぼ一定であるが、このXs/LsはDtの増大とともに増加する。また、当量比一定で点火位置を変えたときの燃焼時間の最小値は、Dt=4.00 mmかつVs=50.8 cm<sup>3</sup>の場合を除いて、Vsが一定ならDtの小さい方が、Dtが一定ならVsの大きい方が小さくなる。

なお、図3のXs=16 mmが図4のDt=6.00 mmのピークの位置に相当し、同様にDt=8.15 mmの場合にも、燃焼時間のピークが得られる付近で点火されると、噴流が繰り返し起こるのが観察される。Dt=12.55 mmの場合には、点火位置を隔壁から次第に遠ざけていくと、Xs/Lsが1.0近くなったとき初めてこのような現象が起こる。しかし、Dt=4.00 mmの場合には、燃

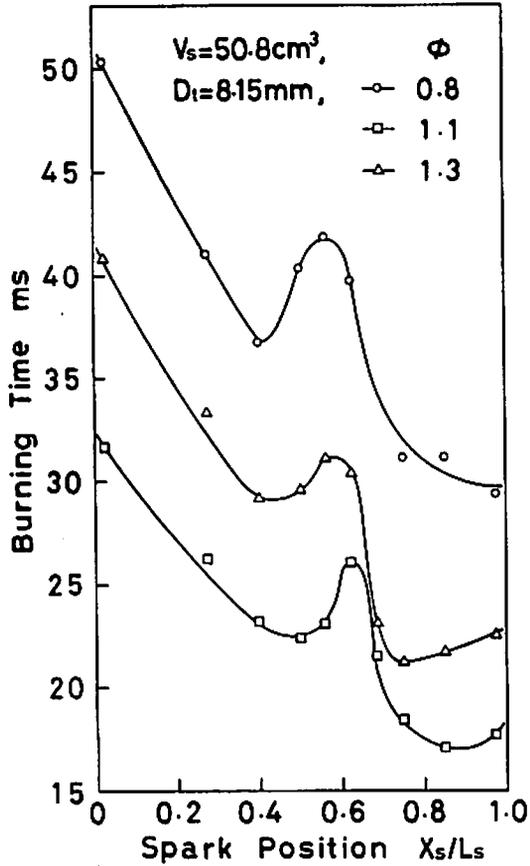


Fig. 6. Change of the burning time with spark position in a subchamber. Parameter : equivalence ratio.

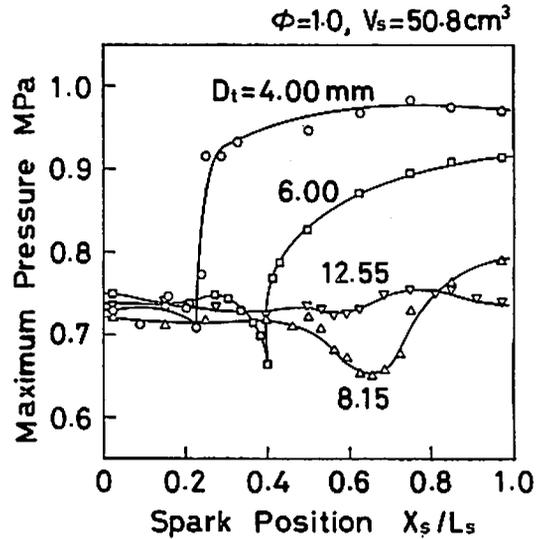


Fig. 7. Change of the maximum pressure with spark position in a subchamber.

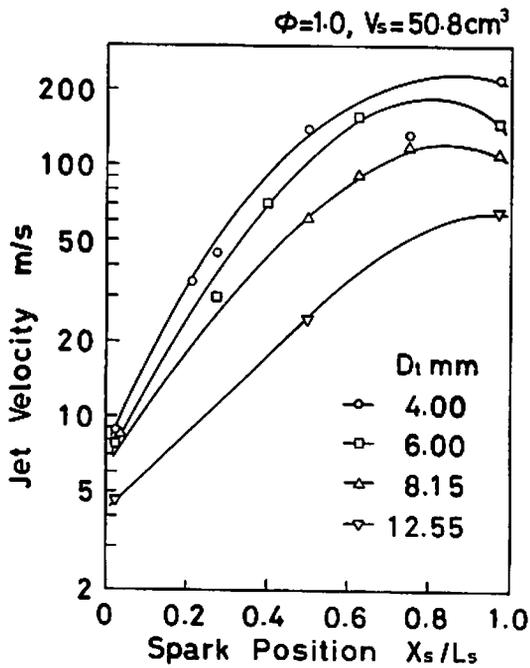


Fig. 8. Tip velocity of the hot gas jet corresponding to the spark position in a subchamber.

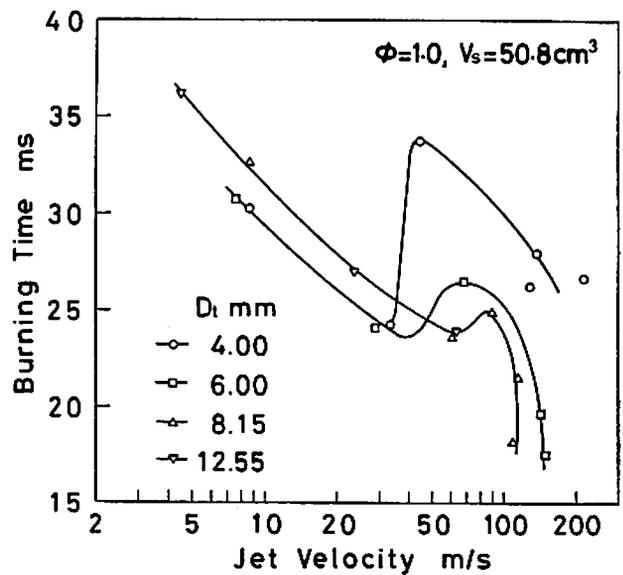


Fig. 9. Effect of the jet velocity on the burning time.

焼時間がピークとなる点火位置でもそのような噴流は観察されず、この位置を境に火炎伝播の形態は不連続的に変化する。

### 3.1.3. 最高圧力

図4の燃焼時間を得たときの最高圧力を図7に示す。Dtが小さくかつXs/Lsが大きい程、主室内に流出するガスの速度が増大し、主室内の火炎の伝播速度は極めて大きく（最高約40 m/s）なるために、主室と副室の圧力差は増大する。さらに、主室内の火炎伝播時間の短縮によって、燃焼ガスの熱損失は減少するので、主室内の最高圧力は、当然Dtの小さい程、Xs/Lsが大きい程、大きくなる。

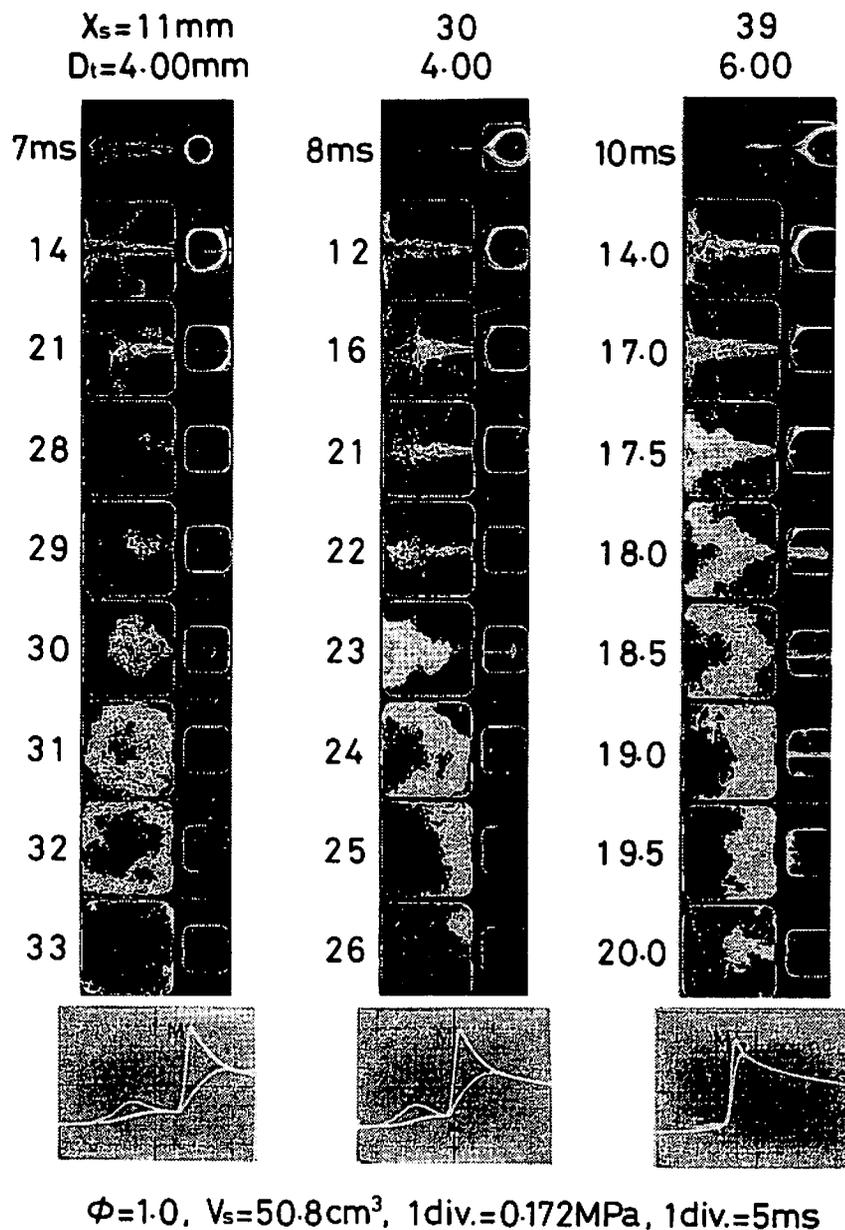


Fig. 10. Simultaneous records of schlieren photographs of flames and pressure traces, which represent rapid flame propagation in a main chamber,

一方この図で、最高圧力の谷が現われる点火位置は、図4の燃焼時間のピークの位置と一致している。最高圧力が低下する原因は、3.1.1で既に述べたとおりである。

#### 3.1.4. 噴出速度の影響

高温ガスの通路付近における噴出速度を、高速度シュリーレン写真より求め、 $X_s/L_s$  に対してプロットしたものを図8に示す。噴出速度は、点火位置を隔壁から遠ざける程、 $D_t$  を小さくする程、大きくなるが、壁面のわずか手前で点火するとき最大値が得られる。この噴出速度に対応する燃焼時間を図9に示す。 $D_t$  が一定ならば噴出速度の増大に伴って燃焼時間は初め減少するが、 $D_t=12.55\text{ mm}$  の場合を除いて、ある流速を越えると逆に増大し、ピークを経て再び減少する。

このように燃焼時間が増大する原因は、前にも触れたが、主室内の火炎伝播開始が、高温ガス

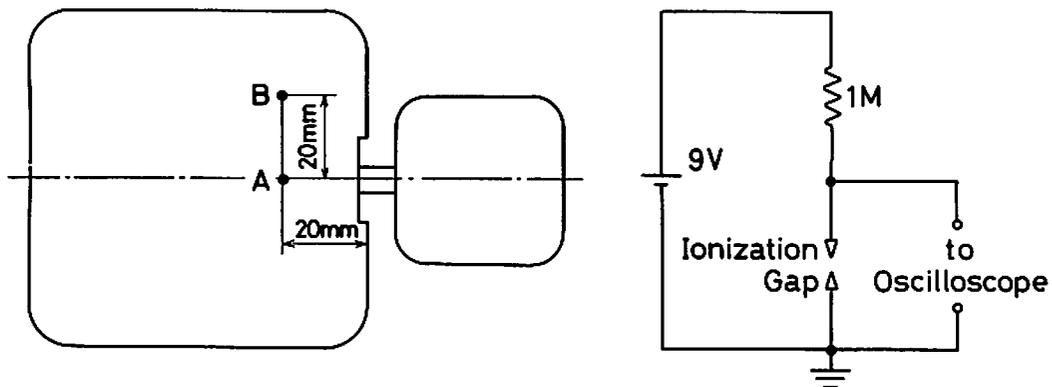


Fig. 11. Measuring points of the ionization current in a main chamber and its circuit.

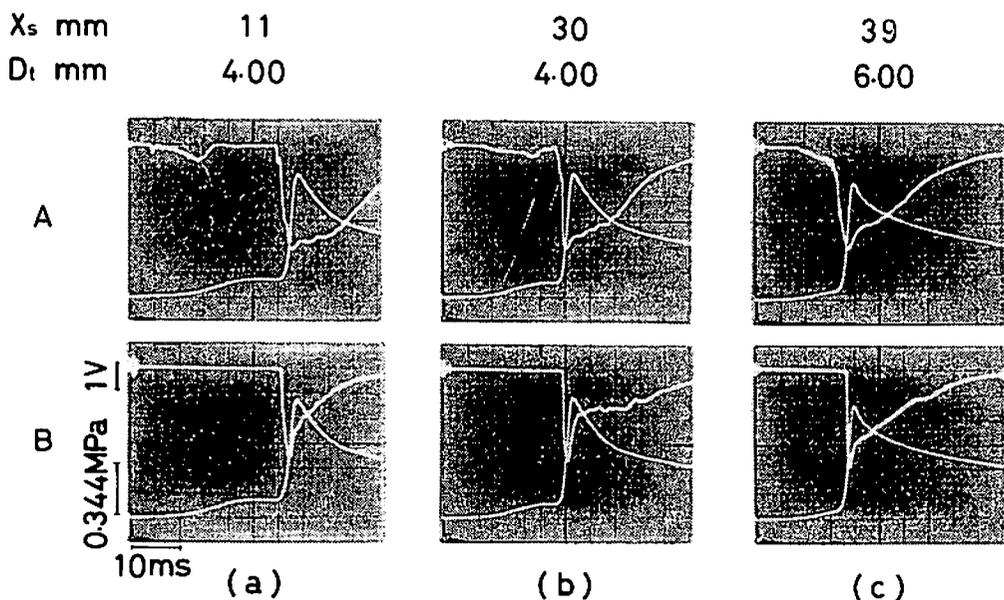


Fig. 12. The ionization current at A and B indicated in Fig. 11 and the pressure in a main chamber. Upper trace : the ionization gap voltage ; lower trace : the pressure in a main chamber.

の噴出始めより著しく遅れるためと考えられる。図10のシュリーレン写真はこの模様を撮影したものであるが、これだけでは火炎面と高温ガスとの判別は困難である。そこで、点火用電極を利用したイオンギャップを用いて、イオン電流の測定を行った。図11には、通路の中心軸を含む垂直断面上の2箇所の測定点AおよびBと、イオン電流回路を示す。この回路では、イオン電流の大きさはイオンギャップにおける電圧降下の大きさとして測定される。測定結果の再現性は極めて良く、その代表例を図12に示す。図中（a）、（b）および（c）はそれぞれ図10の3つの場合に対応する。いずれの場合も、イオン電流が最大値をとる時刻と、圧力上昇速度が最大となる時刻が良く一致することが認められ、主室内ではこの時刻に主要な火炎伝播が行われること

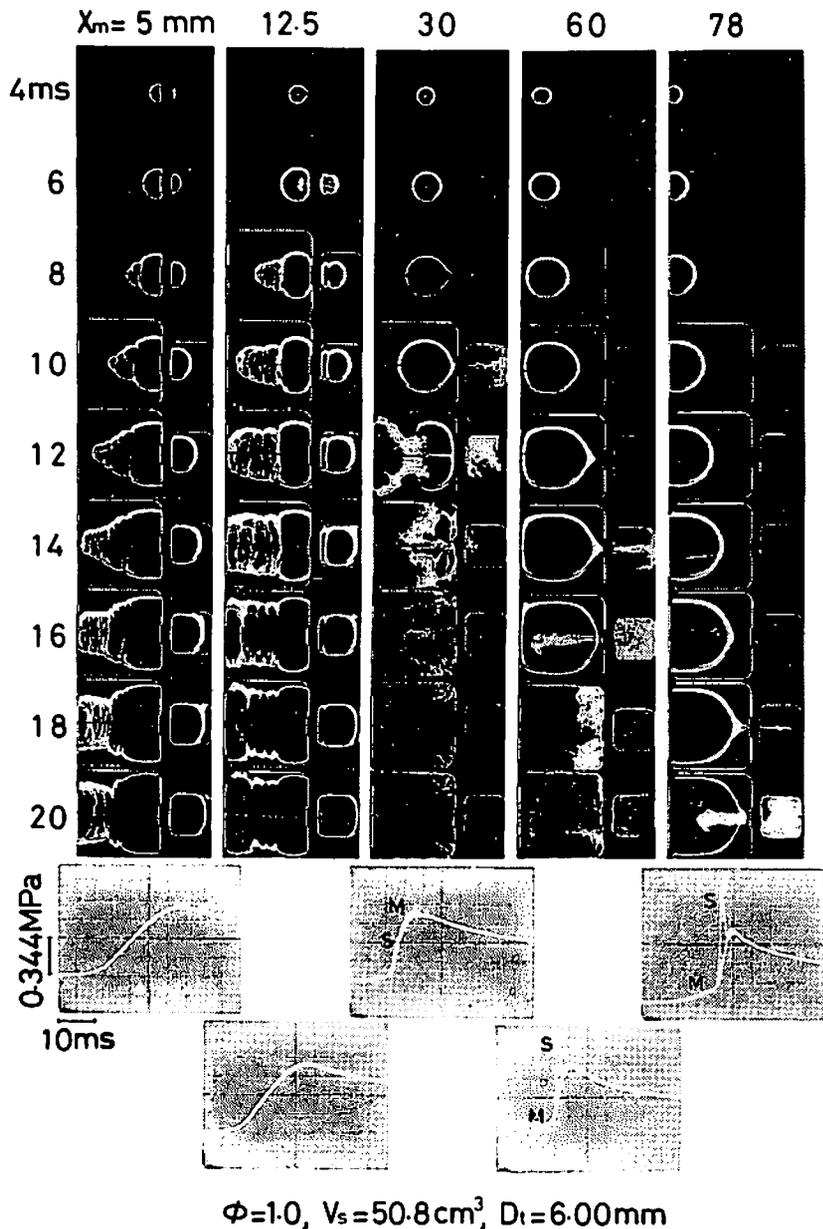


Fig. 13. Simultaneous records of schlieren photographs of flames and pressure traces corresponding to the different spark positions in a main chamber.

は明白である。この火炎伝播は、図10のシュリーレン写真で明瞭に観察することができる。

このように、主室内の混合気への着火が遅れる原因は、高温ガスの断熱膨張、通路壁による冷却および未燃ガスとの乱流混合の相乗効果によって、噴出高温ガスの温度が著しく低下するためと考えられる。

### 3.2. 主室内点火

#### 3.2.1. 火炎伝播過程

主室内で点火した場合の火炎のシュリーレン写真と圧力線図を図13に示す。点火が通路付近で行われる場合 ( $X_m=5\text{ mm}$ ) は、副室内の通路近傍で点火される場合とほぼ同様の火炎伝播過程となる。点火位置が隔壁からやや離れる ( $X_m=12.5\text{ mm}$ ) と、点火から6 ms程度で副室から主室へ逆流するガスが観察される。点火位置が隔壁からさらに遠ざかるに従い、この逆流が起こる時刻は遅れるが、その速度は増大し、主室内に与える乱れも強くなっていることが観察される。

#### 3.2.2. 燃焼時間

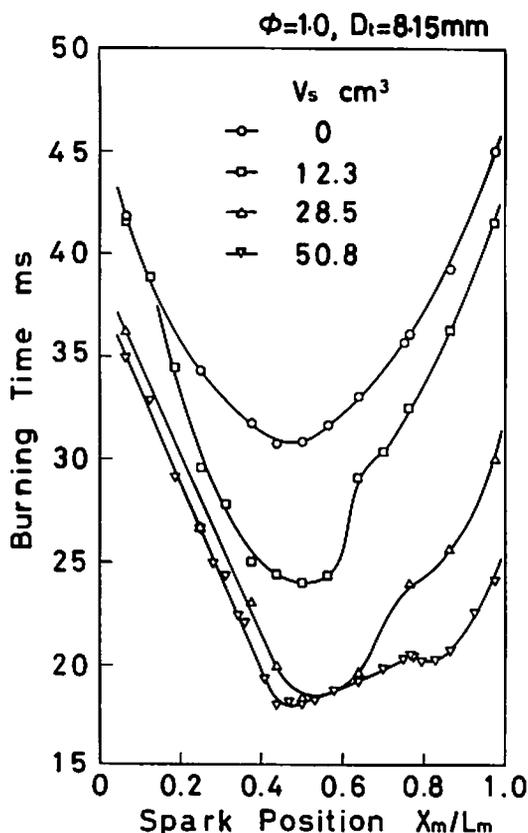


Fig. 14. Change of the burning time with spark position in a main chamber. Parameter: volume of subchamber.

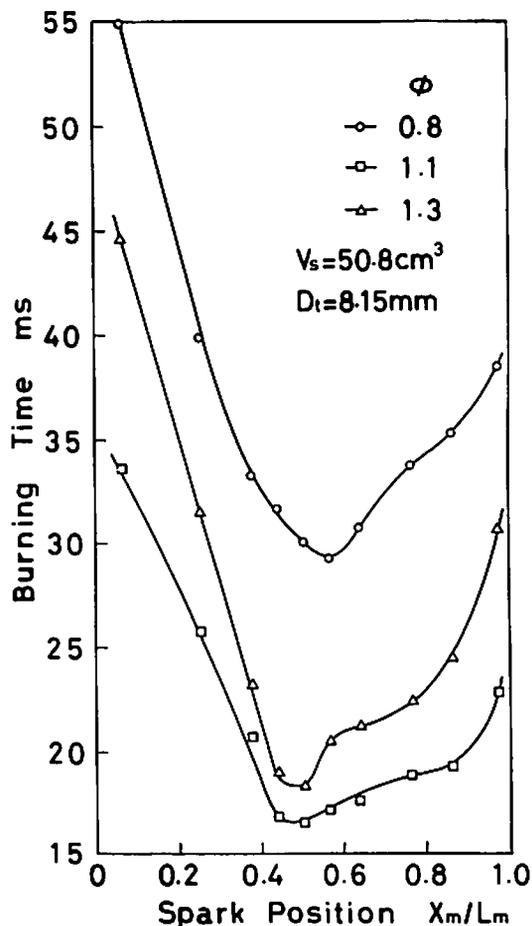


Fig. 15. Change of the burning time with spark position in a main chamber. Parameter: equivalence ratio.

点火が主室内で行われる場合も、副室内点火の場合と同様に燃焼時間を定義し、その測定結果を図14および図15に示す。

これらの図では、 $X_m/L_m$ の増大とともに、燃焼時間は最初減少し、ついで最小値を経由して増加していく。また、図14から、 $D_t$ を変えずに $V_s$ を大きくしていくと、どの点火位置でも燃焼時間は減少し、特に $X_m/L_m$ が大きい程、その減少が大きくなっていることが判る。これは、点火位置が隔壁から比較的離れる（ $X_m/L_m \approx 0.4$ 以上）と、副室内の火炎伝播開始までの期間に、主室から副室に与えられる混合気の質量増加は増大し、 $X_m/L_m$ が小さい場合と較べて副室からの噴出エネルギーが増大するために、主室内の火炎伝播促進に対する副室の寄与が、副室容積の増大によって増幅された結果として理解できる。

混合気の濃度を変えると、図15に示すように、火炎面の乱れが強い点火位置での燃焼時間の短縮が、量論比付近および希薄側と比較して、過濃側ではより大きいことが判る。このようなことは、定容器内プロパン空気混合気の乱流燃焼速度の測定結果でも報告されている<sup>3)</sup>。点火位置のみを変えたとき燃焼時間が最小となる点火位置は、当量比を変えてもあまり変わらない。

図16には、 $V_s=0$ のときの燃焼時間と $V_s=50.8 \text{ cm}^3$ のときの燃焼時間との割合を示し、点火位置は両者ともに同一である。副室が取り付けられたことによる全容積の増大にもかかわらず、燃焼時間はどの点火位置でも短縮され、 $X_m/L_m \approx 0.3$ 以下では $D_t$ の減少に伴ってより大幅に短縮されている。これは、 $D_t$ の小さい方が副室への噴流速度が大きくなるためであろう。

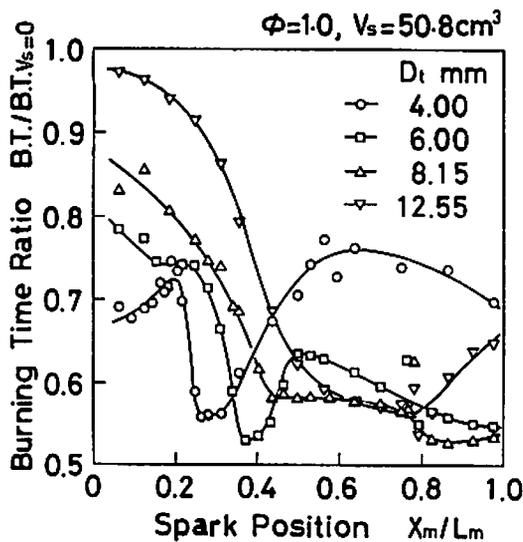


Fig. 16. Effects of a subchamber on the burning time ; spark positions are in a main chamber. Parameter ; throat diameter.

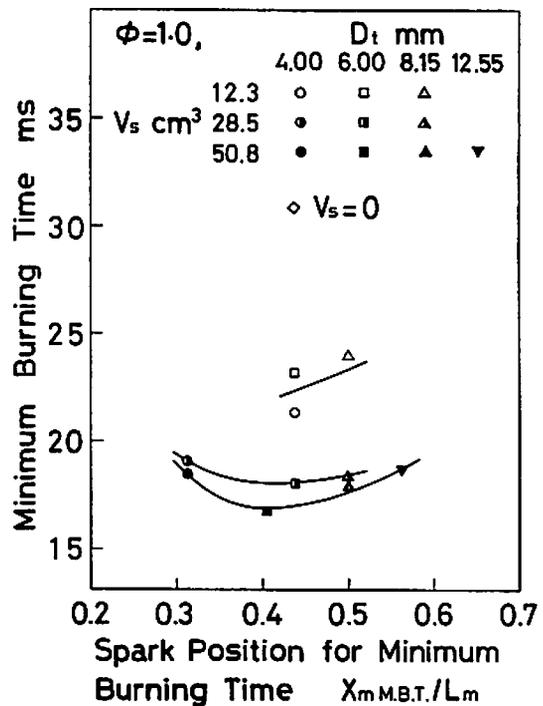


Fig. 17. Minimum burning time obtained through the traverses of a spark gap in a main chamber.

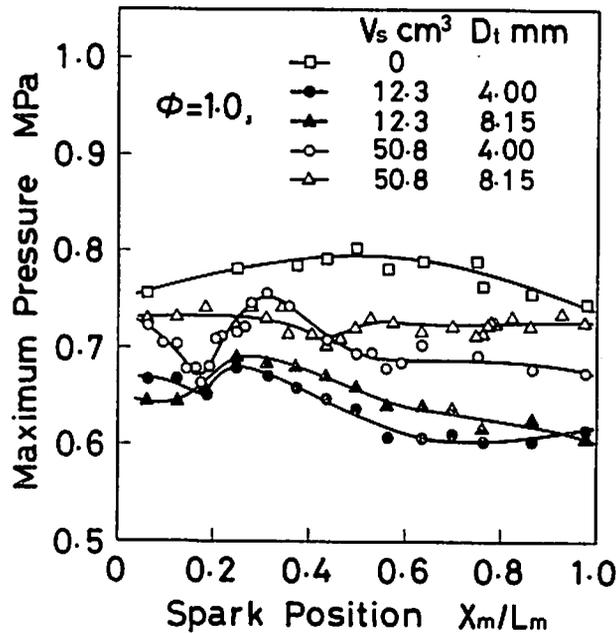


Fig. 18. Change of the maximum pressure with spark position in a main chamber.

図 17 には、点火位置のみを変えたとき得られる最小燃焼時間を、そのときの点火位置に対して示す。図より、最小燃焼時間は  $D_t$  の変化よりも  $V_s$  の変化により大きく依存するが、最小燃焼時間が得られる点火位置は  $D_t$  が小さい程隔壁寄り、 $V_s$  の変化にはあまり影響されないことが判る。

### 3.2.3. 最高圧力

点火位置と最高圧力の関係を図 18 に示す。 $V_s=0$  の場合には、最高圧力は主室のほぼ中央で点火すると最大値をとり、燃焼時間の短縮が熱損失を減少させた結果と考えられる。副室が有る場合の最高圧力は、 $V_s$  および  $D_t$  にも複雑に影響されるが、副室内で点火する場合とは異なり、点火位置の影響はあまり受けない。

## 4. 結 言

定容分割燃焼室におけるプロパン空気混合気中の火炎伝播について、高速度シュリーレン撮影と燃焼室内の圧力測定およびイオンギャップによる測定を行い、複雑な火炎伝播機構を把握するとともに、点火位置、通路の直径、副室容積および混合気の濃度を変えて実験を行うことにより、火炎伝播機構に及ぼすそれらの因子の影響を個々に明らかにするという初期の目的は、一応達成することができた。

本実験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 副室内点火では、火炎伝播に伴う噴流の噴出速度の増大に伴って、主室内の火炎伝播時間は短縮されるが、噴出速度が大きすぎると、主室内の火炎伝播開始が遅れるために、点火か

ら火炎伝播終了までの時間は結局増大することになる。これは、火炎が通路を通過する際に消炎現象が起こっていることを示唆するものである。

- (2) 副室内点火では、点火位置によっては、火炎伝播に伴う噴流が主室と副室の間で繰り返し起こり、火炎伝播時間が増大し、最高圧力が著しく低下することがある。
- (3) 点火位置のみを変えたとき得られる最小燃焼時間の値は、主室内点火の場合の方が、副室内点火の場合より大きくなることはない。

終りに、本実験に関して数々の貴重な御助言を与えられた東京大学教授飯沼一男氏並びに酒井忠美氏に深謝する。また、この研究の一部は昭和53年度文部省特定研究“自動車の排気浄化に関する基礎研究”の研究補助金によることを付記して謝意を表す。

#### 文 献

- 1) M. Noguchi, S. Sanda, N. Nakamura : SAE Trans. 85-760757 (1976), 2358.
- 2) C. F. Marvin, Jr., A. Wharton, C. H. Roeder : NACA T. R. 556 (1936), 251.
- 3) 飯沼, 伊庭, 上野 : 法政大学工学部研究集報12 (1976), 7.