

## 電気的爆発線による混合気の燃焼

山口, 修次 / YAMAGUCHI, Shuji / 岡島, 敏 / 島田, 光男 /  
SHIMADA, Mitsuo / OKAJIMA, Satoshi

---

(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)

19

(開始ページ / Start Page)

35

(終了ページ / End Page)

43

(発行年 / Year)

1983-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004097>

# 電氣的爆発線による混合気の燃焼

山口 修次\*・岡島 敏\*・島田 光男\*

## Combustion of Propane-Air Mixtures Ignited by Electrical Exploding Wire

Shuji YAMAGUCHI, Satoshi OKAJIMA and Mitsuo SHIMADA

### Abstract

The paper describes an experimental work to elucidate the fundamental characteristics and mechanism on flame propagation of propane-air mixtures ignited by exploding wire at the center of a constant volume vessel. The behavior of flame propagation was observed by taking schlieren photographs with a high speed 16-mm movie camera and the pressure rise during combustion process was obtained by a piezoelectric transducer, and analyzed to reveal the effects of released energies and equivalence ratio on fundamental properties such as burning time and mass burning rate.

When the large volume of hot gas is established by exploding wire, the reduction effects of combustion time is markedly large. Facilitation rate of combustion increases with increasing the released energy, and especially it is relatively large in rich mixtures except small released energies as compared with that of lamnar flame.

### §1. 緒 言

金属細線に大電氣量が通電されたとき、その金属線が融解すると同時に放電現象も見られる。しかも、この放電は初めに張られている金属線が放電のトリガーとなって、比較的低い電圧で高エネルギーの火花放電となる。これは一般の内燃機関において、その点火エネルギーが数十ミリジュール程度であるのに比べて極めて高いといえる。また、その放電は金属線が融解し、蒸発した後にも継続し、最後に若干の残留電圧が見られるけれども、電圧が数百ボルト以上になると残留エネルギーが無視できる程に、ほとんどのエネルギーが放出する。

このような金属線の爆発が可燃性混合気中で起こると混合気は急激に燃焼し、極めて乱れの強い場合の乱流燃焼の様相を呈する。この急速燃焼は燃焼の制御という観点で燃焼工学上興味深く、更に、ガス・デトネーションへの起爆の点火源となり、災害をより一層大きなものにするという点で、安全工学の分野においても極めて重要で、かつ、興味深い問題といえる。しかしなが

---

\* 機械工学科

ら、この現象のなかには、高エネルギー放電及び、それに伴って飛散する金属微粒子の影響など複雑な問題を多く含んでいることで不明確な部分が多い。

そこで本研究では、電氣的爆発線による火炎伝播の挙動を高速シュリーレン写真及び火炎伝播中の圧力の測定を行い、更に、これらと通常点火方法を用いたときの火炎伝播の挙動とを比較、検討して、火炎伝播に及ぼす放電エネルギー及び混合気濃度等の影響について調べた。

## §2. 実験装置及び方法

本実験は定積燃焼容器内で行われ、その容器の概略を Fig. 1 に示す。容器はジュラルミン製で、燃焼室形状は、内直径及び長さがそれぞれ 130 mm の円筒形をしており、その両端には観測用のガラス窓が設けられ、側面には、燃焼室内の圧力を測定するための圧力変換器、更に爆発線を取り付けるための電極及び吸・排気用のコック等が装備されている。電極には直径約 1.5 mm の銅線を用い、その針端間隙には爆発線がハンダ付けされて、容器の中心に位置するようになっている。爆発線は直径( $D$ ) 0.1 mm、長さ( $l$ ) 4 mm の白金線である。

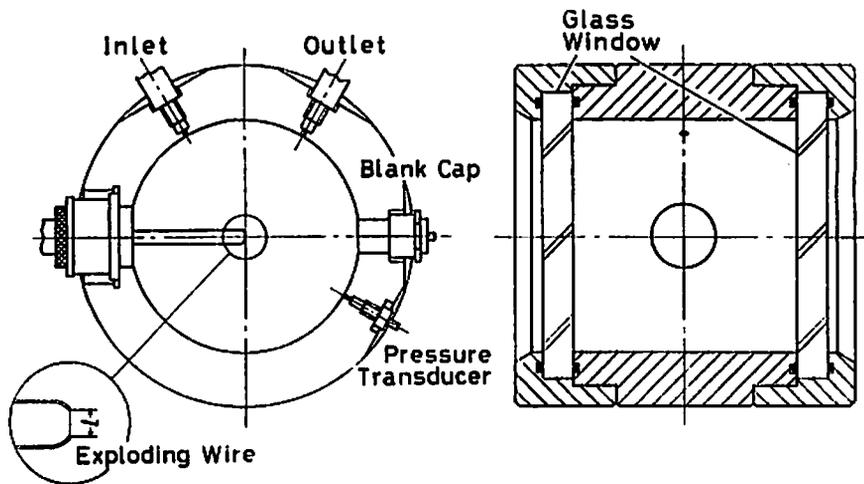


Fig. 1 Combustion vessel.

混合気への点火は、容量放電方式を用いて電氣的に金属線を爆発させることで行い(Fig. 2(a)), その充電エネルギーは直流電源の電圧と蓄電器から得られ、その値は 2.0 J, 3.9 J, 6.5 J, 9.7 J,

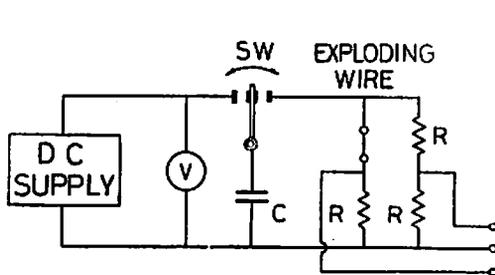


Fig. 2(a) Circuit of exploding wire by condenser discharge.

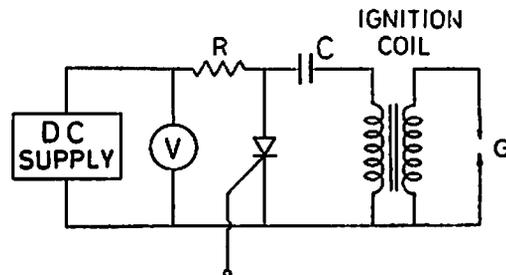


Fig. 2(b) Conventional spark ignition circuit by capacity discharge.

15.7 J である。一方、通常火炎の場合の点火方法は、一般に市販されている自動車機関用の点火コイルを用いた容量放電方式 (Fig. 2(b)) である。その時の点火エネルギーは 30~40 mJ 程度である。電極は直径約 0.1 mm の白金線で、その針端間隙は 1 mm である。混合気はプロパン（純度 99.9%）—空気混合気で、その濃度は当量比 ( $\phi$ ) で 0.8, 1.1, 1.4 である。

実験装置の系統図を Fig. 3 に示す。混合タンク内で所定の濃度に作られた混合気は、あらかじめ真空にされた燃焼容器内に充填される。そして、充填された混合気が静止してからマニュアルスイッチを閉じることによってタイミングマークジェネレータを装備した 16-mm 高速度カメラが起動する。更に、カメラの起動から少し遅れて点火回路によって容器内の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い、燃焼室内の圧力は、点火の信号をトリガーとして圧電式圧力変換器を介してオシロスコープによって記録される。なお、実験における混合気の初期温度及び初期圧力は室温及び大気圧である。

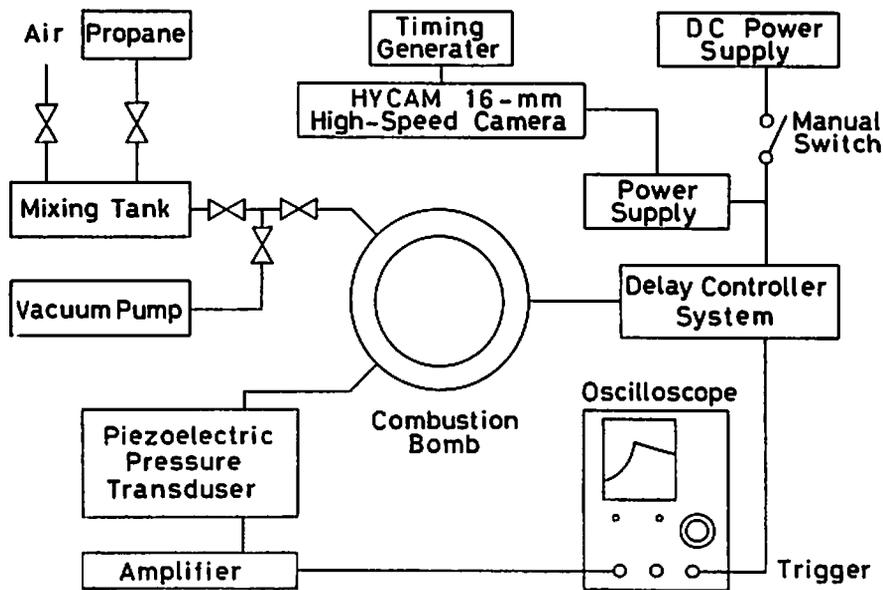


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set up.

### § 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 燃焼初期の火炎性状

通常火花点火及び爆発線点火によって得られた高速度シュリーレン写真の代表例を Fig. 4 に示す。一般に観察される乱流火炎では、乱れの強弱と火炎面の凹凸との対応が認められるけれども、爆発線点火の場合には、点火直後を除けば、火炎形状は球に近い多面体となり、火炎面も極めて細かな粒子状となる。更に、通常火花点火による層流火炎に比較して火炎の伝播が極めて速く、特に、点火直後において火炎の成長が顕しく速くなる。また、爆発線点火とほぼ同時に大きなシュリーレン像が観察される。これは高点火エネルギーによってできる金属線の蒸発したガスと混合気の高温度ガス体と見るのが妥当で、その後で自発点火に近い状態でその部分が高温燃焼す

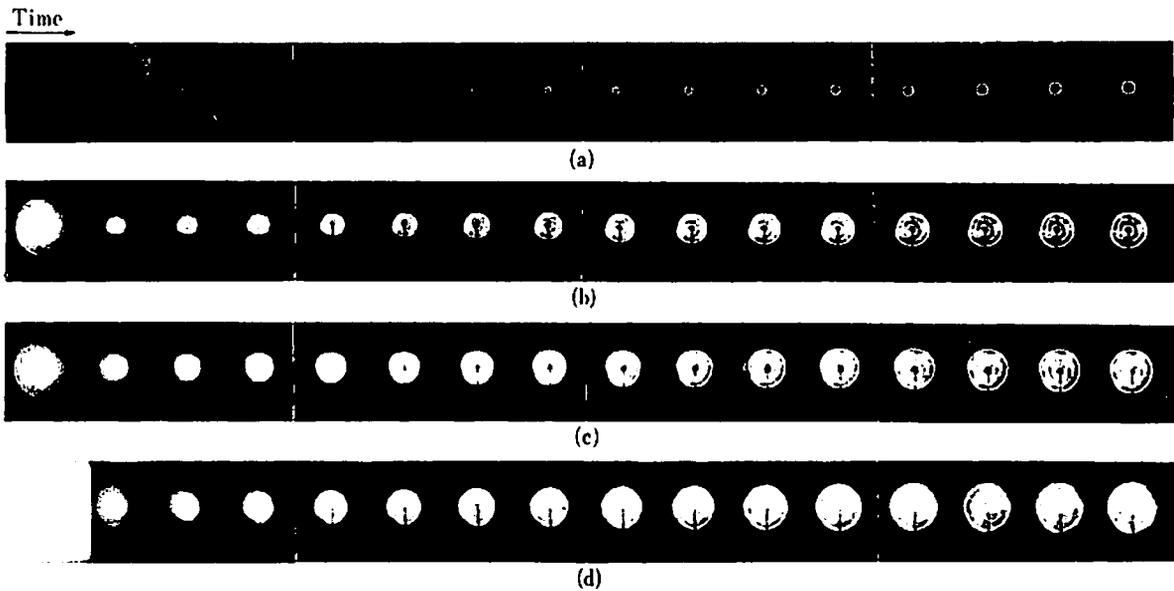


Fig. 4 Schlieren motion pictures of flame development of propane-air mixtures ignited by exploding wire.

Pt wire, 0.1 mm diameter and 4 mm long; Equivalence ratio,  $\phi=1.1$ ; 2700 frames per second; Released energy, (a) normal spark, (b) 2.0 J, (c) 6.5 J, (d) 15.7 J

るものと考えられる。このことは燃焼容器内の圧力振動が起こることからも容易に推察でき、放電エネルギーが大きくなると自発点火で急速燃焼する体積が多くなり、急激な体積膨張を伴うので圧力振動も大きくなる。また、火炎の中心部では、燃焼末期までシュリーレン像が残り周囲とは温度の異なることを示している。この像は放電時間内で形成されるものと思われ、しかも、その大きさは放電エネルギーに対応し、時間の経過に対する変化は少ない。空気中で金属細線を電氣的に爆発させたときの高速度シュリーレン写真を Fig. 5 に示す。蒸発した金属線のガスと高

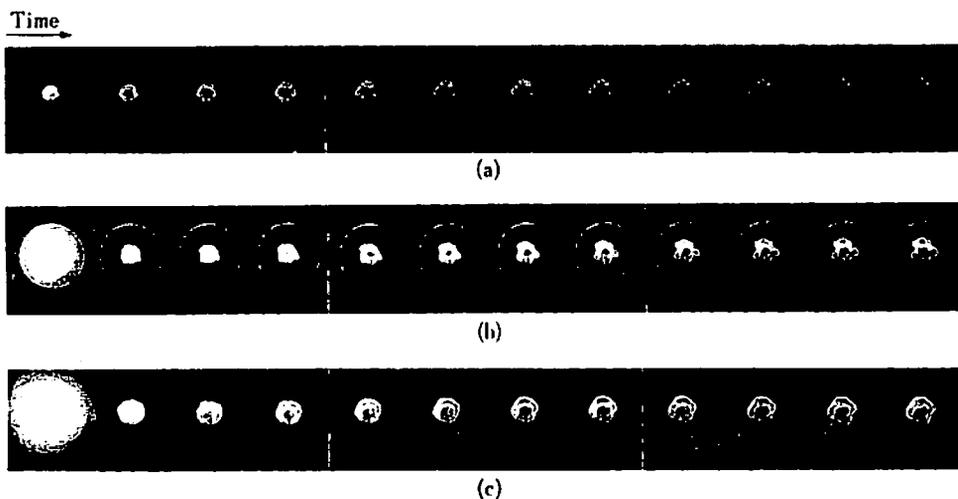


Fig. 5 Schlieren motion pictures of hot gas volume development of air established by exploding wire. Released energy (a) 2.0 J, (b) 6.5 J, (c) 15.7 J.

Pt wire, 0.1 mm diameter and 4 mm long; 2700 frames per second;

温に加熱された空気との区別は困難であるが、点火 (放電) と同時にかなり大きな高温ガス体の形成されているのが分かる。

### 3.2 質量燃焼割合

燃焼室内の圧力測定から得られる任意の時間の圧力 ( $P - P_0$ ) を最高圧力 ( $P_{max} - P_0$ ) で割った値を  $n$  とすると、 $n$  は圧力上昇割合を示すと同時に質量燃焼割合を示す。Figs. 6, 7, 8 に放電エネルギー ( $E$ ) をパラメータとして、 $n$  と燃焼時間 ( $t$ ) の関係を示す。通常点火の層流火炎に比較して爆発線点火の場合がいずれも圧力の立ち上がりが早くなる。

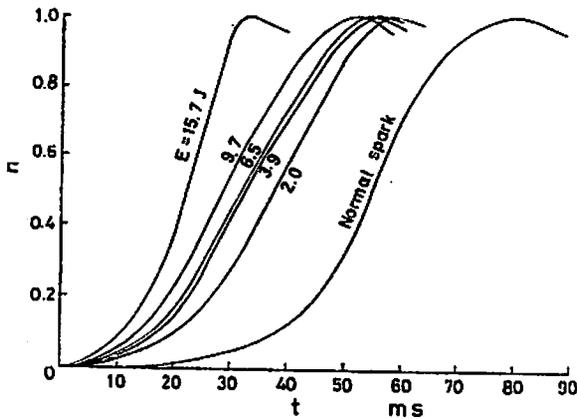


Fig. 6 Variation of burned mass fraction with time. Parameter; Released energy  $E$ , Equivalence ratio 0.8

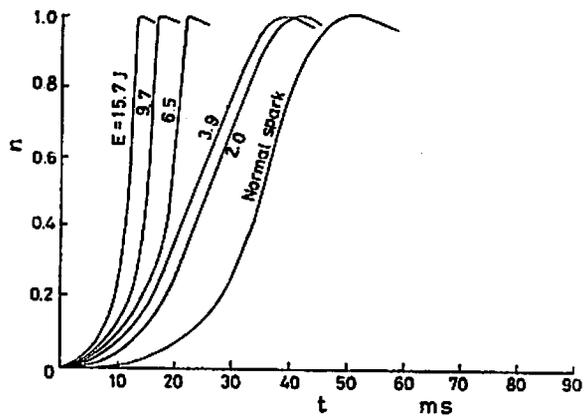


Fig. 7 Variation of burned mass fraction with time. Parameter; Released energy  $E$ , Equivalence ratio 1.1

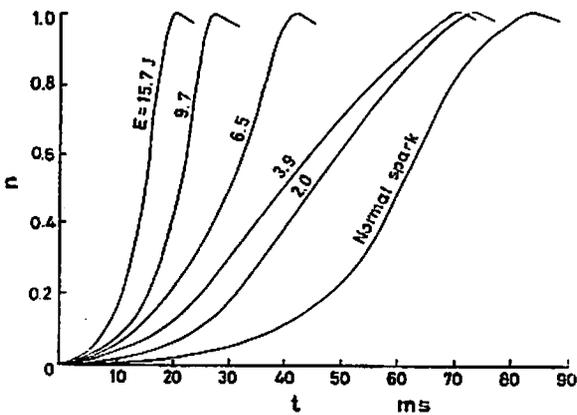


Fig. 8 Variation of burned mass fraction with time. Parameter; Released energy  $E$ , Equivalence ratio 1.4

しかしながら、燃焼の初期を過ぎると層流火炎に比べてその勾配はそれ程大きくなく、むしろ逆に放電エネルギーによっては小さくなる場合もあり、燃焼の初期とそれ以後では質量燃焼割合に対する放電エネルギーの効果が異なる。したがって、Figs. 6, 7, 8 をもとにして、質量燃焼速度 ( $\Delta n / \Delta t$ ) と放電エネルギーの関係を Figs. 9, 10 にそれぞれ示す。Fig. 9 は  $0 \leq n \leq 0.2$  の燃焼初期についてのものである。図示のごとく  $E$  の増加に伴って  $\Delta n / \Delta t$  は直線的に増加し、

$E$  に対する  $\Delta n / \Delta t$  の増加割合は希薄混合気より過濃混合気程大きくなる。一方、Fig. 10 は最大質量燃焼速度と放電エネルギーの関係を示したもので、その  $\Delta n / \Delta t$  は、通常火花点火による層流火炎のときより小さい値をとる  $E$  の領域が存在し、最小値をもつ。この傾向は、いずれの混合気においても同様であり、更にまた、 $E$  を増加させると  $\Delta n / \Delta t$  は理論混合気に近いもの程、急激に増加する。しかしながら、 $E$  を更に増加させても  $\Delta n / \Delta t$  は次第に頭打ちとなり、一定値に漸近するようになる。

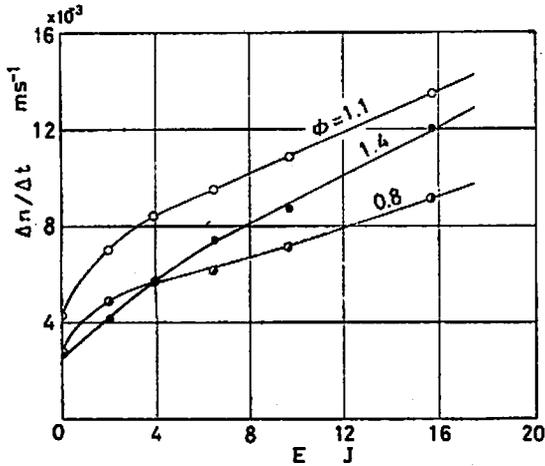


Fig. 9 Variation of mass burning rate with released energy in the earlier stage of combustion. Parameter; Equivalence ratio.

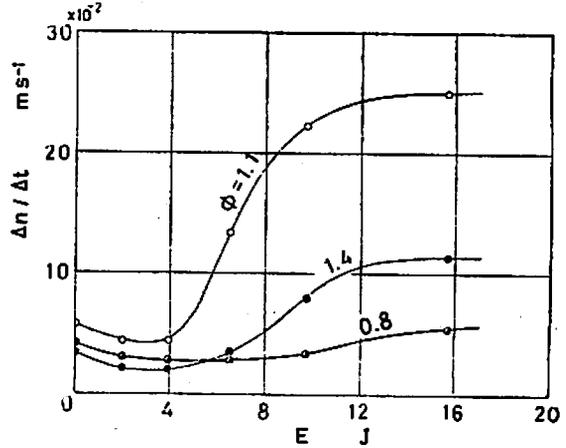


Fig. 10 Variation of maximum mass burning rate with released energy. Parameter; Equivalence ratio.

### 3.3 燃焼時間及びその短縮効果

全燃焼時間 ( $t$ ) は燃焼室内の圧力を測定することから得られ、点火から最高圧力到達時間として求められる。このようにして得られた全燃焼

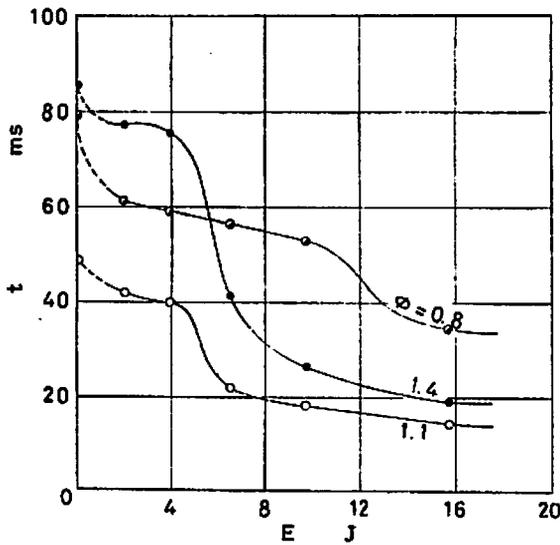


Fig. 11 Change of total burning time with released energy. Parameter; Equivalence ratio.

時間を Fig. 11 に示す。層流燃焼速度の速い混合気程、爆発線点火の場合の全燃焼時間は短くなり、また、 $E$ の小さい値においては、混合気濃度の影響は層流火炎のときに見られる傾向と同様である。しかしながら、 $E$ の値が大きくなると希薄混合気より過濃混合気において全燃焼時間は短くなり、理論混合気的全燃焼時間に近い値とな

る。更に、通常点火及び爆発線点火のときの全燃焼時間をそれぞれ  $t_{on}$  及び  $t_{oe}$  として、 $t_{oe}/t_{on}$  を算出し、爆発線点火における燃焼促進効果を調べた。Fig. 12 に  $t_{oe}/t_{on}$  と  $E$  の関係を示す。図から明らかなように、いずれの混合気の場合も層流火炎におけるより全燃焼時間は短縮し、また、 $E$

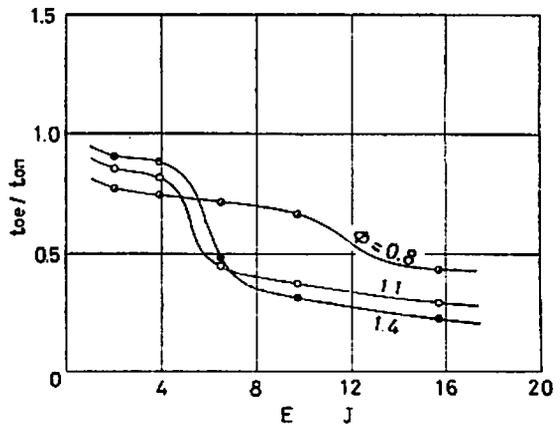


Fig. 12 Rate of burning time of propane-air mixtures ignited by exploding wire and normal spark.

の小さい値では、その増加とともに  $t_{ae}/t_{an}$  の変化は僅かで、更に  $E$  を増加させると  $t_{ae}/t_{an}$  は急に減少する。すなわち、全燃焼時間の短縮効果が急激に現れ、更に、希薄混合気よりも過濃混合気でその短縮効果が大きい。

Fig. 13 は、放電エネルギーの影響を強く受ける燃焼の初期について燃焼時間の短縮割合と  $E$  の関係を示したものである。これは、定容積燃焼において燃焼時の質量燃焼割合を圧力増加割合とみなせることから、通常点火と爆発線点火の場合の燃焼圧力が最高圧力の1/10の圧力に達するまでの燃焼時間をそれぞれ  $\Delta t_n$  及び  $\Delta t_e$  として、 $\Delta t_e/\Delta t_n$  でその短縮割合を比較したものである。いずれの混合気においても、 $E$  の小さい領域を除けば、 $E$  の増加に対してほぼ直線的に  $\Delta t_e/\Delta t_n$  が減少する。また、混合気濃度による差異はあまりなく、放電エネルギーによる高温ガス膨張に起因するものが大きいものと思われる。このように爆発線点火による燃焼では、その初期において、極めて高エネルギーの放電と金属線の融解・蒸発及び周囲への急激な体積膨張などの影響を強く受け、更に燃焼末期には、燃焼容器の形状効果及び冷却効果

などが現れるので、圧力が最高圧力の1/5~4/5に到達するのに要する時間でその短縮割合を求めて Fig. 14 に示す。いずれの混合気においても  $E$  の比較的小さい値で曲線が上に凸となって最大値をもち、しかも、 $\Delta t_e/\Delta t_n$  が1より大きくなり、特に、過濃混合気 ( $\phi=1.4$ ) でその度合いが顕著に現れ、層流火炎の場合の1.4倍となって、火炎伝播がむしろ防げられていることを示している。 $\Delta t_e/\Delta t_n$  が1以上となる  $E$  の範囲は、量論比を離れた混合気程、また、希薄混合気程広がる。 $E$  が  $\Delta t_e/\Delta t_n$  の最大値に対応した値より大きくなると、燃焼時間の短縮効果が急激に現れる。この傾向は濃混合気程顕著である。しかしながら、 $E$  の値を更に大きくしても  $\Delta t_e/\Delta t_n$  はほぼ一定となり、燃焼時間の短縮効果が期待できなくなる。

### 3.4 火炎伝播速度

乱流火炎の伝播速度を算出する方法は層流火炎の伝播速度に比べて、火炎面の構造上の問題で、それ程単純ではない。乱流火炎の伝播速度を求める幾つかの方法のなかで、層流火炎のシ

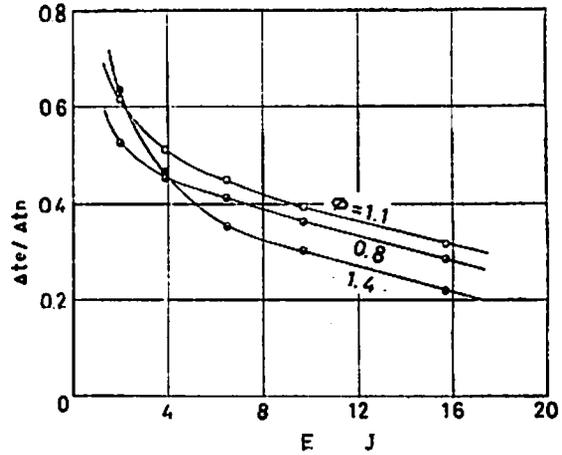


Fig. 13 Reduction effects of burning time released energy in the earlier stage of combustion. Parameter; Equivalence ratio.

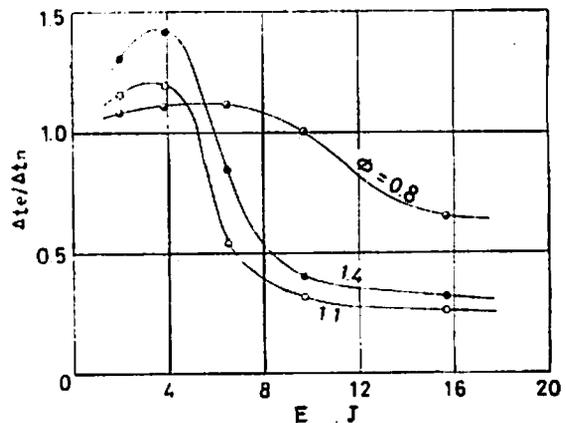


Fig. 14 Ratio of burning time of propane-air mixtures ignited by exploding wire and normal spark.

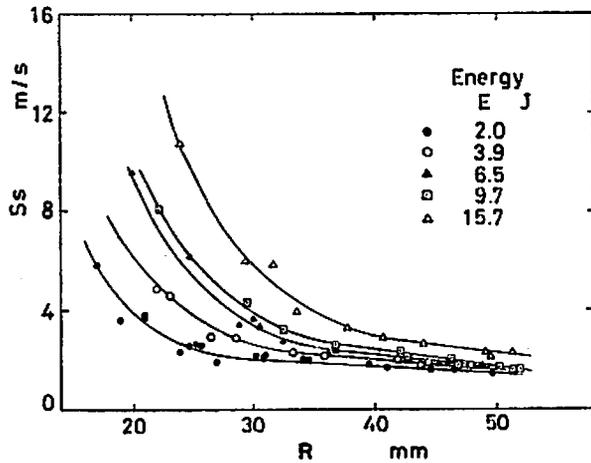


Fig. 15 Relation between flame speed and apparent flame radius; Equivalence ratio 0.8

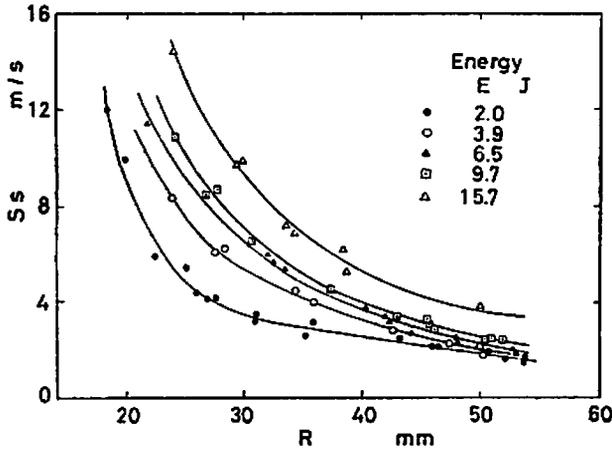


Fig. 16 Relation between flame speed and apparent flame radius; Equivalence ratio 1.1

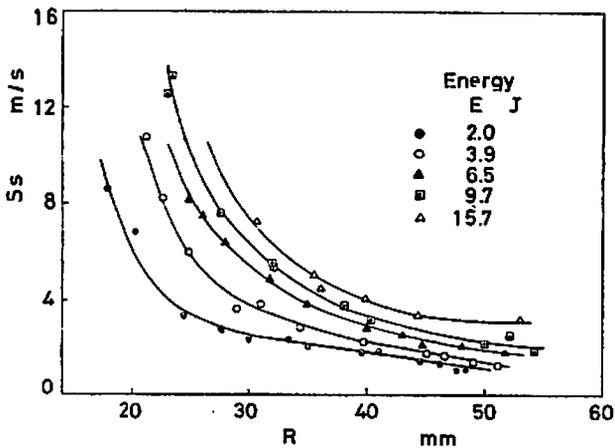


Fig. 17 Relation between flame speed and apparent flame radius; Equivalence ratio 1.4

の測定と比較・検討して、放電エネルギー及び混合気濃度による影響を調べ以下のような結果が得られた。

リーレン写真及び燃焼圧力の履歴から得られるけれども<sup>2)</sup>、この方法では燃焼の初期については、ほとんど不可能に近い。そこで、火炎伝播速度の算出は次のように行った。つまり、高速度シュリーレン写真から得られる火炎断面積を測定し、その断面積に等価の円の半径を求める。この等価半径とそれに対応した時間の変化割合を算出して、火炎伝播速度 ( $S_s$ ) が得られる。このようにして得られる  $S_s$  と等価半径 ( $R$ ) の関係を Figs. 15, 16 及び 17 に示す。混合気中の乱れが容器の半径方向で一様であれば、定容積内の乱流燃焼の場合でも等価火炎半径の時間的変化割合、すなわち、火炎伝播速度が、ある火炎半径の範囲で一定値を示す。しかしながら、図示のように、爆發線点火の場合には、 $S_s$  は電極近傍で極めて大きな値を示し、 $R$  の増加とともに減少し、また、 $E$  による差異も少なくなる。電極近傍で  $S_s$  が極めて速くなるのは、高エネルギー放電によって高温に加熱された混合気の分散が主な要因であり、その後の領域では、高温ガスの急激な膨張と分散によって作られる混合気の乱れに起因するもの大きいと考えられる。

#### §4. 結 言

定容積燃焼室内で、プロパン-空気混合気を電氣的爆發線によって点火したときの燃焼について、その火炎伝播機構を明確にするために、高速度シュリーレン写真の撮影及び燃焼室内の圧力測定を行い、層流火炎について

- (1) 高エネルギー放電による混合気の加熱とそれに加えて高温ガスが周囲へ衝撃波を伴って分散することで自発点火を起し、ノッキングと同様の現象が起こる。そのため燃焼の初期では火炎伝播速度は極めて速くなり、電極に近い程指数関数的に火炎伝播速度は大きくなる。
- (2) 燃焼の初期では、燃焼促進効果は放電エネルギーの増加とともに大きくなり、それ以後の燃焼では、放電エネルギーの増加とともに層流火炎のときより燃焼時間が大きくなる。続いて促進効果が極めて急激に現れ、その後燃焼時間の短縮効果は頭打ちとなる。
- (3) 全燃焼時間は濃混合気程、その短縮効果が大きい。燃焼の初期では、混合気濃度による促進効果の差異は僅かになる。それより後の燃焼では、量論より濃い混合気で放電エネルギーの増加とともに燃焼促進効果は急激に現れ、更に放電エネルギーの大きい値で、希薄混合気を除けば、燃焼促進効果はほぼ等しくなる。

#### 文 献

- 1) 酒井忠美：機械の研究，16（1964），1017，1135.
- 2) 山口，岡島：機械学会講演論文集，No. 814-6（昭56.3），72.