

対向噴霧方式を用いた不均質燃焼場の燃焼特性に及ぼす点火の影響について

飯塚, 捷 / IIZUKA, Sho

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012925>

対向噴霧方式を用いた不均質燃焼場の燃焼特性に 及ぼす点火の影響について

THE EFFECT OF IGNITION ON COMBUSTION CHARACTERISTICS
FOR HETEROGENEOUS COMBUSTION FIELD BY USING IMPINGING INJECTION

飯塚 捷

Sho IIZUKA

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程

For the problem of global warming, air pollution and drying up of the fossil fuel, a automotive engine has been demanded with the technological development which can be high efficiency combustion and reduce the emissions of toxic substance(CO_2 , NO_x , CO , HC , SO_x , PM). In recent years, gasoline direct injection that injects fuel directly in a cylinder have attracted attention as the fuel supply method of automotive gasoline engine, it enables high efficiency combustion and low CO_2 emissions. However it occurs unburned emissions because of the fuel attach for direct injection, furthermore, stratified-charge operation is prone to combustion instabilities because fuel is injected late during the compression stroke.

This study has been carried out to examine the effect of multi-point ignitions on combustion characteristics for heterogeneous combustion field by using impinging injection in a constant volume chamber. The main conclusions are as follows; 1) Under the heterogeneous combustion field, the maximum burning pressure increases and the total burning time decreases by using the ignition timing difference than the three-point simultaneous ignitions at same overall equivalence ratio. 2) The maximum heat release rate increases by using the ignition timing difference than the three-point simultaneous ignitions at same overall equivalence ratio. 3) It is possible to control the combustion behavior by using the ignition timing difference under the increasing the initial pressure.

Key Words : *Heterogeneous combustion, Multi-point ignition, Ignition timing, initial pressure*

1. 緒論

地球温暖化や大気汚染, 化石燃料の枯渇といった問題から, 自動車用エンジンでは高効率燃焼及び有害物質の排出低減が可能となる技術開発が求められている。

近年の自動車用ガソリンエンジンの燃料供給システムとして, シリンダー内に燃料を直接噴射させる筒内直接噴射方式が注目されている。この筒内直接噴射方式を用いることで, 成層燃焼を用いた希薄燃焼による運転が可能となり, 高効率燃焼及び二酸化炭素の排出低減が可能となる。しかし, 噴霧燃料をシリンダー内へ直接噴射しているため, 噴霧燃料がシリンダー壁面やピストン頂面に付着し, 未燃成分が発生してしまう問題点も存在する。また, 希薄混合気燃焼を実現できる成層燃焼の研究も多くの研究者により行われている。^{[1], [2]}

本研究では燃料の微粒化及びシリンダー壁面などへの

燃料付着低減を目的として, 燃焼容器中心方向へ容器両端から燃料を噴射させ, 噴霧燃料を互いに衝突させる対向噴霧方式を用いた。これを用いることで, 1 つのインジェクターから燃料を噴射させる単噴霧方式に比べ燃焼促進効果が得られることがこれまでの研究により確認されている。

また, 成層燃焼は圧縮行程後期に燃料を噴射させるため, 混合気形成の制御が難しく燃焼が不安定となる問題がある。^[3] そこで, 本研究では成層燃焼場における燃焼改善を図るため, 同時及び点火タイミングの異なる多点点火方式を用い, 二段点火による火炎の干渉効果及び点火位置の差異による燃焼促進について検討を行った。

さらに, より実機に近い環境を想定し, 加圧下において大気圧下と同様に上記による燃焼促進効果についても検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1 に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。装置は主に燃焼容器、噴射装置、点火装置、遅延回路及びデータサンプリング制御系から構成されている。燃焼容器は、内径 160mm、長さ 120mm の円筒形(内容積約 2500cc)で、点火プラグ、圧力ピックアップセンサ、インジェクター及び吸排気用コックが取り付けられている。また、噴射装置はインジェクター、燃料供給用燃料タンク、噴射量調整燃料ポンプ、噴射タイミング調整遅延回路等から構成されており、噴射量調整燃料ポンプ内の圧力を燃料供給バイパス管の開閉開度を調整することにより、噴射量を調整することが可能となっている。なお、点火は汎用の自動車用リレー回路を利用した火花点火方式を採用した。実験に際してまず、燃焼容器内を真空にした後、燃焼容器内に予め作成しておいた所定のプロパン-空気混合気を導入する。なお、大気圧下での燃焼実験の場合は、給排気コックにより大気圧開放を行い、加圧下における燃焼実験では、120kPa(絶対圧)まで導入する。次に、マニュアルスイッチを投入することにより、火花点火が行われ、遅延回路を介して燃焼室内への燃料噴射が開始することにより、成層燃焼場を模擬した燃焼特性を観察することが可能である。本実験は室温、導入予混合気圧力は大気圧及び 120kPa で行われ、噴霧燃料として n -ヘキサデカン ($C_{16}H_{34}$) を使用した。燃焼特性に関しては、圧力履歴観察用圧力ピックアップセンサ(ピエゾ型)を用い、得られた信号を Kyowa Electronic Instruments 製 PCD-320A を用いて PC に出力し、最高燃焼圧力及び全燃焼時間の測定・記録を行った。

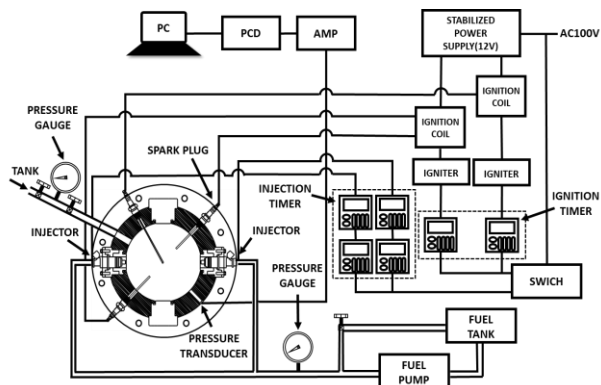


Fig.1 Experimental apparatus

3. 実験条件の設定

(1) 総括当量比 Φ とプロパン-空気混合気の当量比 ϕ

本研究では、プロパン-空気混合気に n -ヘキサデカンを噴射させているため、総括当量比 Φ を用いた。Table 1 に本実験における総括当量比 Φ 及びプロパン-空気混合気の当量比 ϕ の条件を示す。

(2) 点火プラグの配置

点火プラグには鋼線が取り付けられており、長さを調

節することで、火花点火位置を燃焼容器中心から壁面近傍まで変化させることが可能となっている。本実験では三点点火方式を用いた。三点点火方式の点火プラグの配置は Fig.2 に示すように、燃焼容器中心と点火プラグとの距離を変化させ、燃焼容器中心から 0mm、40mm 及び 60mm とした。また、図のように、燃料噴射を行うインジェクターは燃焼容器両端に設置した。

(3) 点火時間差の設定

点火時間差の設定は、0mm(燃焼容器中心)に位置する点火プラグの点火開始時刻を 0sec とし、他の 2 点の点火プラグの点火開始時刻を 0.01sec 刻みで、0~0.04sec の範囲で変化させた。なお、点火時間差が 0sec の場合は、三点同時点火である。また、燃料噴射のタイミングは中心点火開始直後とした。

Table 1 Experimental conditions of overall equivalence ratio and equivalence ratio of propane-air mixtures

Overall equivalence ratio Φ	Equivalence ratio of propane-air mixtures ϕ
1.05	0.9, 0.8, 0.7
0.95	0.9, 0.8, 0.7
0.85	0.8, 0.7

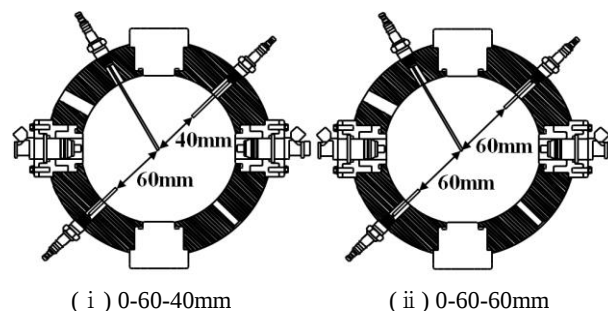


Fig.2 Spark-plug position

4. 実験結果及び考察

Fig.3 に総括当量比 $\Phi=1.05$ における、点火時間差に対する最高燃焼圧力をプロパン-空気混合気の当量比及び点火プラグ間距離をパラメータとして示す。また、このときの全燃焼時間を Fig.4 に示す。Fig.3 から、どのパラメータにおいても三点同時点火(点火時間差 0sec)よりも点火時間差を設けた場合の方が、最高燃焼圧力の値は増大していることがわかる。また、点火時間差 0.03sec 付近で最高燃焼圧力は最大値を取っている。これに対応して、Fig.4 から全燃焼時間は減少しており、点火時間差 0.03sec 付近で全燃焼時間は最小値を取っている。これらは、中心点火によって発生した火炎に対して、他の二点から遅延して発生した火炎が干渉することで、部分的な温度上昇やそれに伴う乱れの発生により燃焼促進効果が得られたものと考えられる。また、噴霧燃料に着目すると、対向噴霧方式により燃料は燃焼容器両端から中心

に向かって噴射され、中心点火によって発生した火炎面にて燃焼する。このとき、燃焼に関与しなかった噴霧液滴は互いに衝突し、微粒化及び周囲との予混合化が促進され、燃焼容器壁面に向かって一部が飛散すると考えられる。そして、火炎の干渉により発生した部分的な温度上昇及び乱れの発生によって、これまでに燃焼が完了しなかった噴霧液滴の燃焼が促進されると思われる。本実験範囲内では、点火時間差 0.03sec においてこれらが顕著に発生したものと考えられる。また、Fig.3, Fig.4 より、同一総括当量比においても、導入予混合気の当量比により最高燃焼圧力及び全燃焼時間の値に差異が発生していることがわかる。これは、導入予混合気の当量比が希薄なほど、噴霧燃料の量が増加し、噴霧燃料の気化潜熱が増大した為だと考えられる。よって、不均質燃焼場では同一総括当量比においても、気相の当量比及び燃料噴射量の割合が重要であることが示唆される。Fig.3,

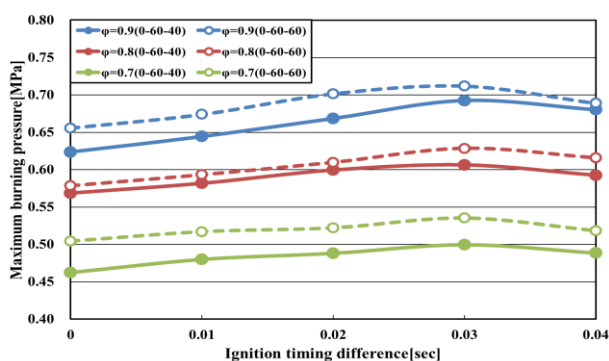


Fig.3 Maximum burning pressure ($\Phi=1.05$)

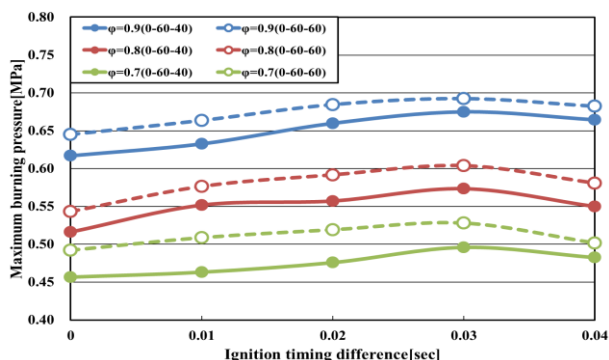


Fig.5 Maximum burning pressure ($\Phi=0.95$)

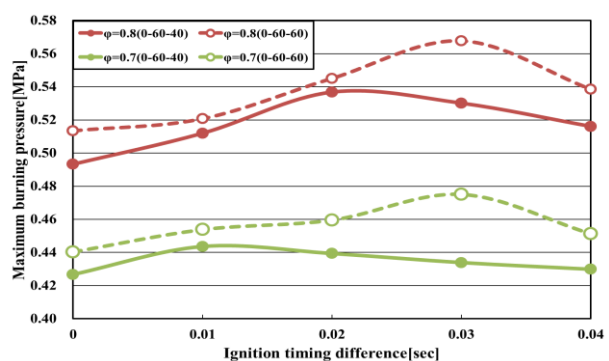


Fig.7 Maximum burning pressure ($\Phi=0.85$)

Fig.4 において点火プラグ間距離 0-60-60[mm]に着目すると、0-60-40[mm]と比較して、どの当量比においても最高燃焼圧力は増大し、全燃焼時間は減少していることがわかる。これは、噴射された燃料液滴は、燃焼容器壁面において熱損失が発生するが、壁面付近に点火位置を配置することで、燃焼末期における火炎面から壁面への熱損失が低減できた為と考えられる。

Fig.5 に総括当量比 $\Phi=0.95$ における、点火時間差に対する最高燃焼圧力をプロパン-空気混合気の当量比及び点火プラグ間距離をパラメータとして示す。また、このときの全燃焼時間を Fig.6 に示す。同様に、Fig.7 に総括当量比 $\Phi=0.85$ における最高燃焼圧力を、このときの全燃焼時間を Fig.8 に示す。これらより、総括当量比 $\Phi=0.95$ 及び 0.85 の希薄燃焼領域下においても、点火時間差を設けた三点点火方式を用いることで、火炎の干渉による燃焼促進が得られ、適切な点火タイミングが存在

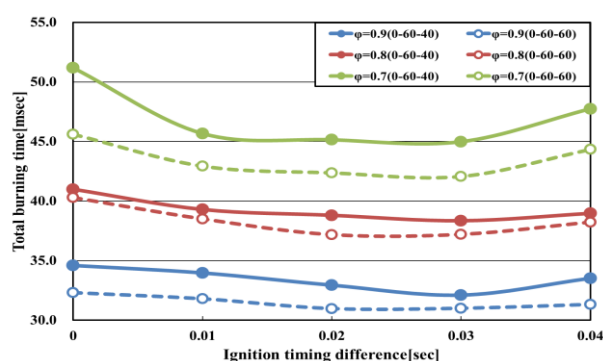


Fig.4 Total burning time ($\Phi=1.05$)

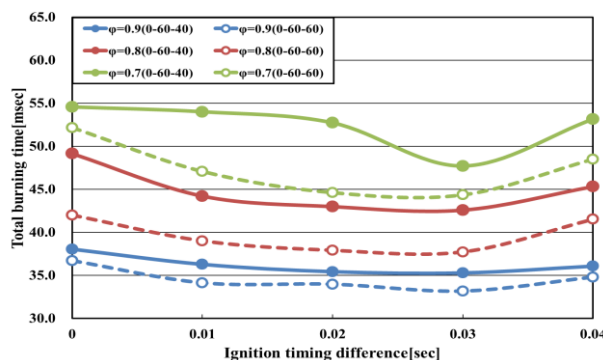


Fig.6 Total burning time ($\Phi=0.95$)

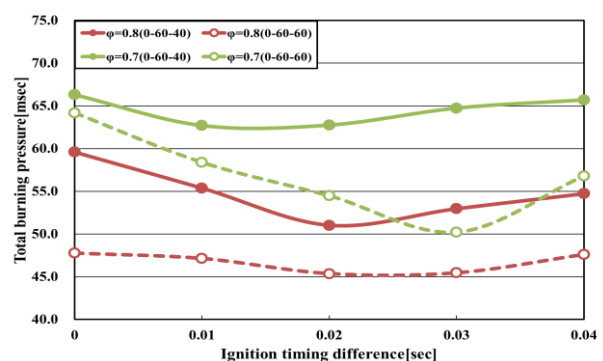


Fig.8 Total burning time ($\Phi=0.85$)

することが確認された。

点火時間差を設けた場合の燃焼改善を評価するため、増大率による検討を行った。Fig.9 に総括当量比 $\Phi=1.05$ において、三点同時点火での最高燃焼圧力に対する、各点火時間差での最高燃焼圧力の増大率を、プロパン-空気混合気の当量比及び点火プラグ間距離をパラメータとして示す。また、このときの全燃焼時間の増大率を Fig.10 に示す。なお、全燃焼時間の増大率は負の値となっているが、これは減少率を意味する。最高燃焼圧力及び全燃焼時間の増大率はそれぞれ(1), (2)式により算出した。

$$\frac{P_{i\text{sec}} - P_{0\text{sec}}}{P_{0\text{sec}}} \times 100 [\%] \quad (i = 0.01 \sim 0.04) \quad \dots (1)$$

$$\frac{T_{i\text{sec}} - T_{0\text{sec}}}{T_{0\text{sec}}} \times 100 [\%] \quad (i = 0.01 \sim 0.04) \quad \dots (2)$$

$P_{i\text{sec}}$: 各点火時間差での最高燃焼圧力, $P_{0\text{sec}}$: 三点同時点火での最高燃焼圧力, $T_{i\text{sec}}$: 各点火時間差での全燃焼時間, $T_{0\text{sec}}$: 三点同時点火での全燃焼時間, である。Fig.9 において, Fig.3 で最高燃焼圧力が最大値となった点火時間差 0.03sec に着目すると, 当量比及び点火プラグ間距離により若干の差異があるが, 6~10%程度増大していることがわかる。また, Fig.10 において, Fig.4 で全燃焼時間が最小値となった点火時間差 0.03sec に着目すると, 4~12%程度減少していることがわかる。その他の実験条件においても, 最高燃焼圧力は最大 10%程度の増大, 全燃焼時間は最大 20%程度の減少が確認された。

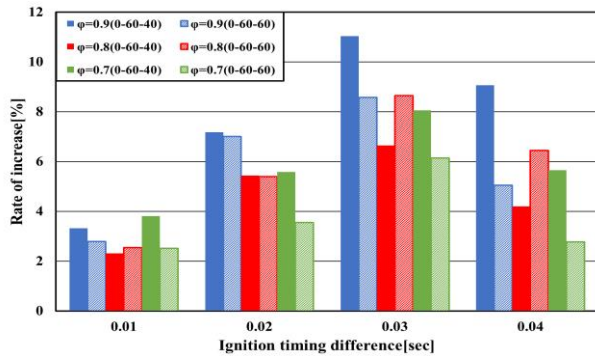


Fig.9 Rate of increase of maximum burning pressure ($\Phi=1.05$)

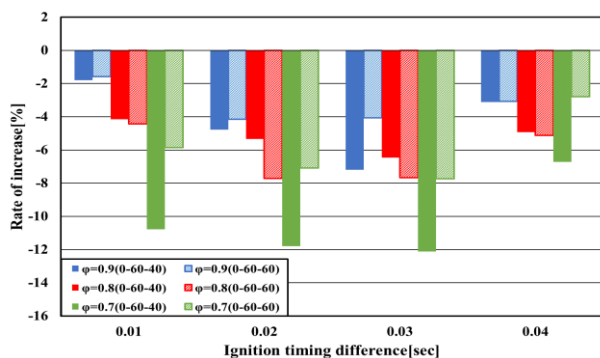


Fig.10 Rate of increase of total burning time ($\Phi=1.05$)

Fig.11 に総括当量比 $\Phi=1.05$, プロパン-空気混合気の当量比 $\phi=0.9$ における, 点火から最高燃焼圧力発生までの経過時間に対する熱発生率を点火時間差及び点火プラグ間距離をパラメータとして示す。なお, 熱発生率については一般に (3) 式で表されるが, 本研究ではクランク角 θ に相当するものとして経過時間 t を用いた。また燃焼過程においては, 燃焼室は定容のため, 熱発生率は (4) 式を用いて算出した。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{\kappa}{\kappa-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad \dots (3)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{C_v}{R} V \frac{dp}{dt} \quad \dots (4)$$

ここで, dQ/dt : 熱発生率, C_v : 定容比熱, R : 気体定数, p : 燃焼圧力, V : 燃焼室容積, である。この図より, 三点同時点火よりも点火時間差を設けた場合の方が, 熱発生率は急峻に増大し, 最大熱発生率は増加していることがわかる。特に, 点火時間差 0.03sec に着目すると, 他の点火時間差と比較して最大熱発生率は増大していることから, 最適な点火タイミングを設けることで熱発生率の改善も可能であると思われる。また, 0-60-60[mm]の方が 0-60-40[mm]と比較してどの点火時間差においても最大熱発生率は増大していることがわかる。その他の実験条件においても, 点火時間差を設けることで三点同時点火よりも最大熱発生率は増大し, 0-60-60[mm]の方が 0-60-40[mm]と比較してどの点火時間差においても最大熱発生率は増大する傾向が見られたが, 点火プラグ間距離 0-60-40[mm], 総括当量比 $\Phi=0.85$, プロパン-空気混合気の当量比 $\phi=0.7$ においては, 点火時間差を設けることによる最高燃焼圧力の増大及び全燃焼時間の減少が見られたものの, 最大熱発生率の増大は観察されなかった。これは, 最高燃焼圧力の増大率及び全燃焼時間の減少率共に小さかった為だと思われる。よって, 希薄燃焼領域下においては, 点火時間差を設けることで最高燃焼圧力の増大及び全燃焼時間の減少が可能となるが, これらの増大率及び減少率が小さいため, 熱発生率の改善には至らない条件が存在すると考えられる。

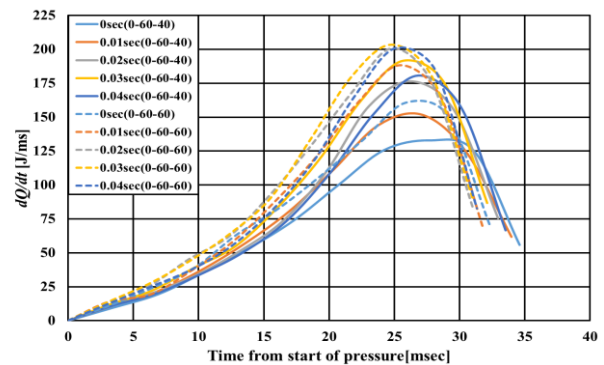


Fig.11 Heat release rate ($\Phi=1.05$, $\phi=0.9$)

点火位置の差異が最高燃焼圧力及び全燃焼時間に与える影響を評価するため、増大率による検討を行った。Fig.12 に点火プラグ間距離 0-60-40[mm]，総括当量比 $\Phi=1.05$ において，各点火時間差での最高燃焼圧力及び全燃焼時間に対する，0-60-60[mm]において各点火時間差での最高燃焼圧力及び全燃焼時間の増大率を，プロパン-空気混合気の当量比をパラメータとして示す。最高燃焼圧力及び全燃焼時間の増大率はそれぞれ(5)，(6)式により算出した。

$$\frac{P_{0-60-60} - P_{0-60-40}}{P_{0-60-40}} \times 100 [\%] \quad \dots (5)$$

$$\frac{T_{0-60-60} - T_{0-60-40}}{T_{0-60-40}} \times 100 [\%] \quad \dots (6)$$

$P_{0-60-60}$: 点火プラグ間距離 0-60-60[mm]における各点火時間差での最高燃焼圧力， $P_{0-60-40}$: 0-60-40[mm]における各点火時間差での最高燃焼圧力， $T_{0-60-60}$: 0-60-60[mm]における各点火時間差での全燃焼時間， $T_{0-60-40}$: 0-60-40[mm]における各点火時間差での全燃焼時間，である。この図より，どの点火時間差においても，最高燃焼圧力は増大しており，全燃焼時間は減少していることがわかる。点火時間差や当量比によって若干の差異があるが，最高燃焼圧力は2～8%程度増大，全燃焼時間は2～10%程度減少していることがわかる。その他の実験条件においても，最高燃焼圧力は最大10%程度の増大，全燃焼時間は最大20%程度の減少が確認された。これより，点火位置が燃焼特性に及ぼす影響は大きく，実機で応用する場合，点火位置の設定が重要となる。

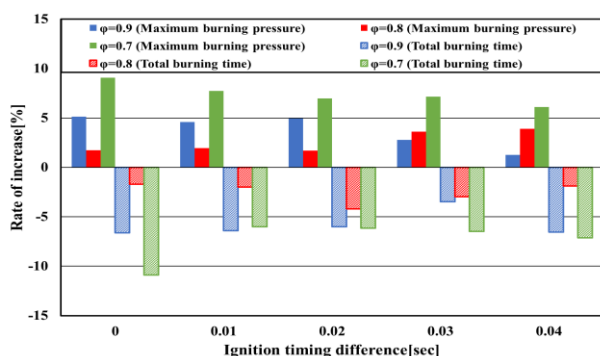


Fig.12 Rate of increase of maximum burning pressure and total burning time ($\Phi=1.05$)

上記の実験結果は大気圧下の条件であるが，実機での成層燃焼は圧縮行程後期に燃料噴射を行うため，雰囲気圧力は高圧である。そこで，導入予混合気(プロパン-空気混合気)の圧力を120kPaとした加圧下における，点火時間差を設けた三点点火方式が最高燃焼圧力，全燃焼時間及び熱発生率に与える影響についても検討を行った。

Fig.13 に点火プラグ間距離 0-60-40[mm]，総括当量比 Φ

$=1.05$ ，プロパン-空気混合気の当量比 $\phi=0.9$ における，点火時間差に対する最高燃焼圧力及び全燃焼時間を導入予混合気の圧力をパラメータとして示す。この図より，120kPaの加圧下においても，三点同時点火よりも点火時間差を設けた場合の方が，最高燃焼圧力の値は増大し，全燃焼時間の値は減少していることがわかる。また，点火時間差0.03sec付近で最高燃焼圧力は最大値を取り，全燃焼時間は最小値を取っている。これより，120kPaの加圧下においても，火炎の干渉による燃焼促進が得られ，適切な点火タイミングが存在すると思われる。

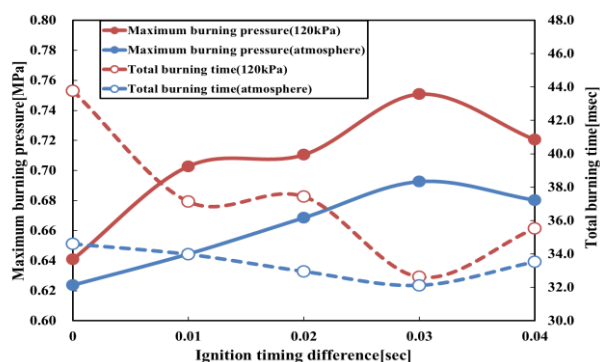


Fig.13 Maximum burning pressure and total burning time (Initial pressure : 120kPa, $\Phi=1.05$, $\phi=0.9$, 0-60-40[mm])

Fig.14 に Fig.13 において，大気圧下で得られた各点火時間差での最高燃焼圧力及び全燃焼時間の値に対する，120kPaの加圧下で得られた各点火時間差での最高燃焼圧力及び全燃焼時間の増大率を示す。この図から，全ての点火時間差において120kPaの加圧下の場合の方が，大気圧下と比較して最高燃焼圧力の値は増大していることがわかる。一方，全燃焼時間の値に着目すると，120kPaの加圧下の方が全ての点火時間差において増大していることがわかる。これは，大気圧下と比較して，雰囲気圧力増大による導入予混合気及び噴霧液滴の拡散速度減少に伴い，火炎伝播速度が減少した為だと考えられる。しかし，点火時間差0.03secにおける全燃焼時間の増大率に着目すると，他の点火時間差におけるそれと比較して小さく，適切な点火タイミングを設けることで，全燃焼時

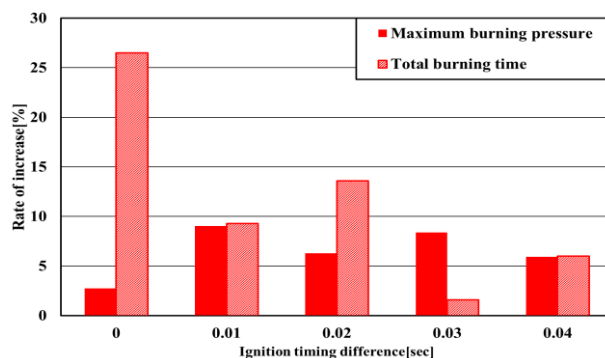


Fig.14 Rate of increase of maximum burning pressure and total burning time (Initial pressure : 120kPa)

間の増大を抑制することが可能である。

Fig.15 に Fig.13 で得られた、三点同時点火での最高燃焼圧力及び全燃焼時間に対する、各点火時間差での最高燃焼圧力及び全燃焼時間の増大率を導入予混合気圧力をパラメータとして示す。この図から、どの点火時間差においても大気圧下よりも 120kPa の加圧下の方が、最高燃焼圧力の増大率及び全燃焼時間の減少率は増大していることがわかる。これより、本実験範囲内では、三点同時点火での最高燃焼圧力及び全燃焼時間に対する、点火時間差を設けた場合の最高燃焼圧力の増大率及び全燃焼時間の減少率は、導入予混合気の圧力により差異が発生することが確認された。

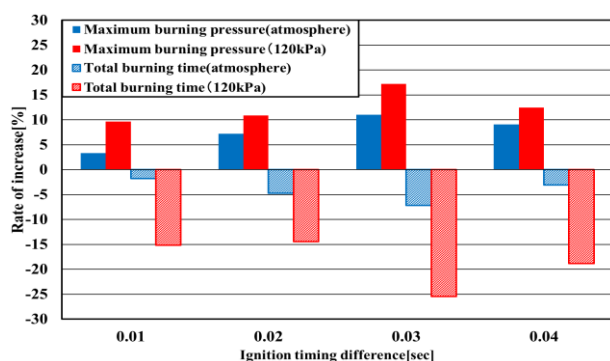


Fig.15 Rate of increase of maximum burning pressure and total burning time (Initial pressure : 120kPa)

Fig.16 に点火プラグ間距離 0-60-40[mm]、総括当量比 $\Phi = 1.05$ 、プロパン-空気混合気の当量比 $\phi = 0.9$ において、点火から最高燃焼圧力発生までの経過時間に対する熱発生率を、点火時間差及び導入予混合気圧力をパラメータとして示す。この図より、120kPa の加圧下においても、三点同時点火よりも点火時間差を設けた場合の方が熱発生率は急峻に増大し、最大熱発生率は増加していることがわかる。また、最大熱発生率が観察されるまでの時間は減少していることもわかる。特に、Fig.13 において最高燃焼圧力が最大値を取り、全燃焼時間が最小値を取った点火時間差 0.03sec に着目すると、他の点火時間差と比較して最大熱発生率は増大していることから、最適な点火タイミングを設けることで熱発生率の改善も可能であると思われる。

一方、大気圧下と比較すると、120kPa の加圧下の方が全ての点火時間差において、最大熱発生率が観察されるまでの時間は増大していることがわかる。これは、大気圧下と比較して全ての点火時間差において、全燃焼時間の値が増大したためである。さらに、点火時間差 0.01, 0.03sec, 0.04sec では大気圧下と比較して最大熱発生率の値は増大しているのに対し、点火時間差 0, 0.02sec では大気圧下と比較して最大熱発生率の値は減少していることがわかる。これは、Fig.13 において、大気圧下と 120kPa の加圧下における全燃焼時間の差異が影響しているもの

と考えられる。すなわち、120kPa の加圧下では、大気圧下と比較して全ての点火時間差において最高燃焼圧力の増大と共に全燃焼時間も増大し、特に点火時間差 0, 0.02sec では大気圧下での全燃焼時間との差が大きくなったため、熱発生率に大きく影響する圧力上昇率 (dp/dt) が大気圧下と比較して減少したものと考えられる。これより、加圧下においては全燃焼時間が圧力上昇率に及ぼす影響が大きく、最高燃焼圧力のみならず熱発生率による検討が重要であると思われる。

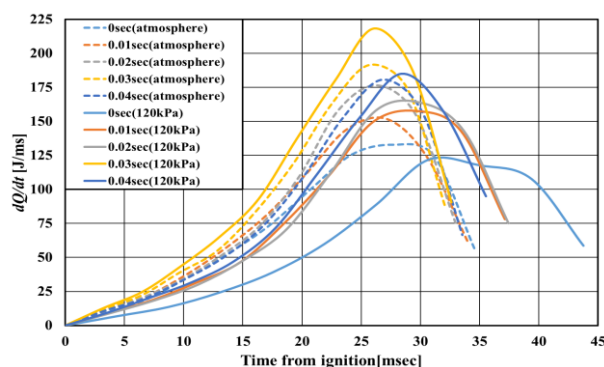


Fig.16 Heat release rate (Initial pressure : 120kPa)

5. 結論

本研究では、定容容器を用いて、プロパン-空気混合気に対向噴霧方式によって n-ヘキサデカンを噴射させた不均質燃焼場における、点火時間差を設けた三点点火方式が燃焼特性に及ぼす影響を検討した。以下に結果を示す。

- (1) 不均質燃焼場において、三点同時点火よりも点火時間差を設けることにより、同一総括当量比においても、最高燃焼圧力は増大し、全燃焼時間は減少する。
- (2) 三点同時点火よりも点火時間差を設けることにより、同一総括当量比においても、最大熱発生率は増大する。
- (3) 加圧下においても、点火タイミングの差異による燃焼制御が可能である。

謝辞：研究を行うにあたり、終始ご指導下さいました、川上忠重教授に熱く御礼申し上げますとともに、心より感謝の意を示します。また、研究を行うにあたり協力して下さい下さった大学院生、学部生、ワークショップの皆様、そして、共に研究に励んだ寺門駿氏にも熱く感謝致します。

参考文献

- 1) 原田・他 2 名, 機論 B, 67-660, 2141, 2001
- 2) 西島・他 2 名, 機論 B, 68-670, 1824, 2002
- 3) Brian Peterson, David L. Reuss, Volker Sick, Combustion and Flame, 161, 240-255, 2014.