

火花点火機関における誘電体バリア放電を用いた  
着火性改善に関する研究

井 上 貴 裕



## 目 次

第 1 章 はじめに.....	1
1.1 地球温暖化と自動車業界の動向.....	1
1.2 着火現象.....	7
1.3 先行研究.....	11
1.4 本論文の目的と構成.....	14
第 2 章 定容容器を用いた火花放電挙動の分析 .....	16
2.1 序論.....	16
2.2 実験装置および方法.....	16
2.3 実験結果および考察.....	25
2.3.1 基礎特性評価.....	25
2.3.2 流速依存性 .....	29
2.3.3 燃焼条件の影響 .....	30
2.4 高流動に効果的な点火方法の考察 .....	32
2.5 結論.....	32
第 3 章 多段パルス放電の着火性評価.....	34
3.1 序論.....	34
3.2 実験装置および方法.....	34
3.2.1 単気筒可視化エンジン .....	34
3.2.2 多段パルス放電 .....	36
3.2.3 実験条件 .....	37
3.3 実験結果および考察.....	38
3.3.1 多段パルス放電と SI の燃焼特性比較.....	38
3.3.2 点火プラグ近傍における初期火炎核形成の可視化観察 .....	42
3.4 結論.....	44
第 4 章 誘電体バリア放電の着火性評価 .....	45
4.1 序論.....	45
4.2 DBD の原理と狙い .....	45
4.3 実験装置.....	47
4.3.1 DBD プラグ .....	47

4.3.2 交流電源 .....	48
4.3.3 燃焼容器 .....	49
4.4 昇圧環境下における DBD 特性.....	50
4.5 DBD 点火特性 .....	54
4.6 結論.....	59
第 5 章 HCCI 燃焼への応用.....	60
5.1 序論.....	60
5.2 オゾナイザシステム .....	60
5.2.1 システム概要.....	60
5.2.2 オゾン発生器.....	61
5.2.3 電源 .....	63
5.3 オゾン発生量測定試験 .....	65
5.3.1 試験概要 .....	65
5.3.2 試験結果および考察 .....	65
5.4 HCCI 燃焼へのオゾナイザ効果検証.....	68
5.4.1 実験概要 .....	68
5.4.2 オゾナイザ STEP 動作の HCCI 燃焼への影響.....	70
5.4.3 HCCI 過渡燃焼へのオゾナイザ効果検証.....	71
5.5 結論.....	72
第 6 章 結論 .....	74
付録 A 点火装置の歴史.....	77
付録 B 点火プラグの構造 .....	79
付録 C 最適点火時期.....	81
参考文献.....	83
謝辞 .....	89
研究業績.....	90

# 第1章 はじめに

## 1.1 地球温暖化と自動車業界の動向

世界気象機関（World Meteorological Organization :WMO）によると、図 1.1 に示すように世界の平均気温は近年で急速に上昇しており、1850 年～1900 年と比べ約 1.0 度上昇している<sup>(1)</sup>。このような状況を背景として 2015 年にパリ協定が採択され、世界共通の長期目標として、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力を追求すること」などが合意された<sup>(2)</sup>。実現に向けて、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出量を減少させる種々の取り組みが世界中で進められており、120 以上の国と地域が「2050 年カーボンニュートラル」という目標を掲げている。我が国においても「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言している<sup>(3)</sup>。

以上のように地球温暖化に向けた取り組みは全世界で共通した課題として広く認識されており、あらゆる産業において温室効果ガスの排出量を減らすための技術開発が求められている。当然、自動車業界にとっても極めて重要な社会課題である。温室効果ガスにはいくつかの種類があるが、図 1.2 に示すように人為起源の温室効果ガスの総排出量のガスの種類別の割合において 76% を二酸化炭素が占めており<sup>(4)</sup>、いかに二酸化炭素の排出量を減らすかが重要となる。

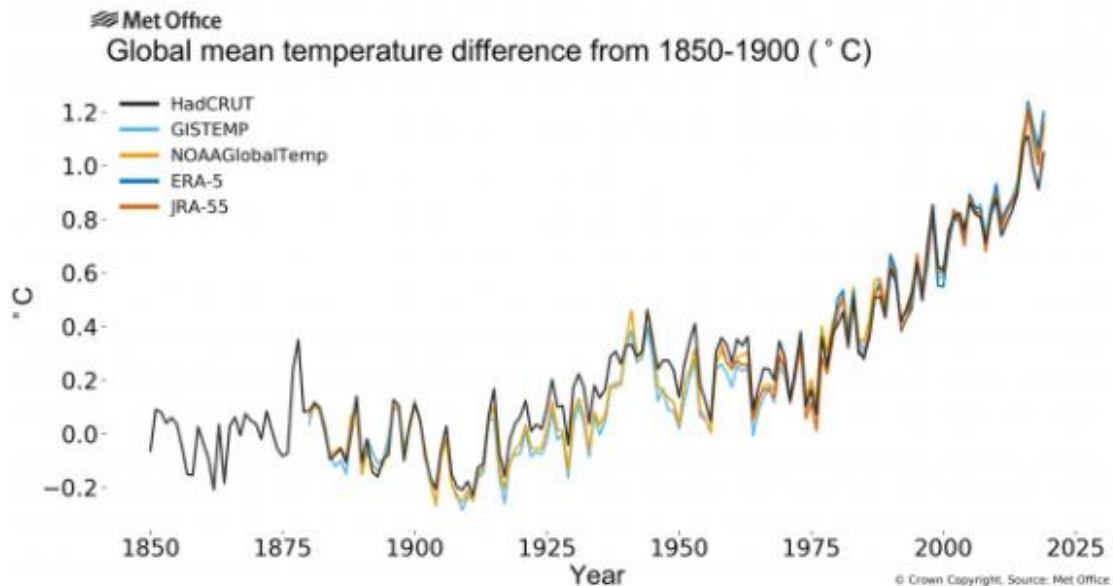


Fig.1.1 Average temperature of the earth <sup>(1)</sup>

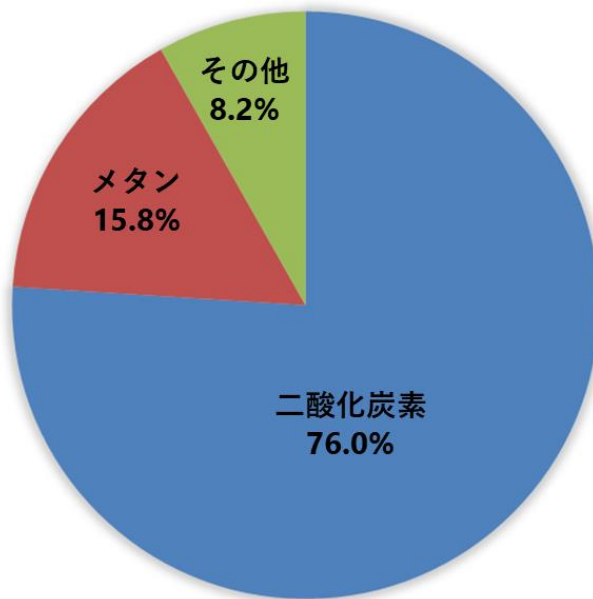


Fig.1.2 Percentage of total greenhouse gas emissions by gas type<sup>(4)</sup>

我が国における部門別二酸化炭素排出量の割合を図 1.3 に示す<sup>(5)</sup>。発電所などのエネルギー転換部門が最も多く、全体の約 39.1%を占める。続いて産業部門が約 25.2%を占め、運輸部門は 3 番目に多い約 17.9%を占める。運輸部門の排出量は自動車による部分が大きく、いかに自動車からの排出量を減らすかが重要である。取り組みの一つとして走行時に二酸化炭素を排出しない電気自動車の開発が進められているが、現状は様々な課題を抱えている。純粋な内燃機関で走行する自動車と比べて価格が高いこと、航続距離が短いこと、充電に時間を要することなどである。また、社会的な課題としては、公共充電設備の充実化だけでなく、バッテリー資源の安定供給およびリサイクルスキームの構築なども進めていく必要がある。このような課題により、電気自動車の十分な普及には少なくとも十数年を要すると予想されている。また、走行時に二酸化炭素が排出されなくても、発電部門の負荷が増えることが懸念され、さらに送電ロスも存在する。

以上で述べたような状況により、当面はハイブリッドを含む内燃機関搭載の自動車が主流であるとされている。近年では、油田から走行までの二酸化炭素排出量(well to wheel)を指標としてより少ない代替燃料の議論も進んでいるが、いずれにしても内燃機関の燃費改善は重要である。図 1.4 に各国・地域の燃費規制値(乗用車)の推移および見通しを示す<sup>(6)</sup>。地球温暖化だけでなく燃料枯渇など他の問題も背景に含まれるが、世界的に燃費規制はますます厳しくなっている。2025 年には 2015 年比で 40%レベルの改善が求められており、継続した研究開発が必要である。

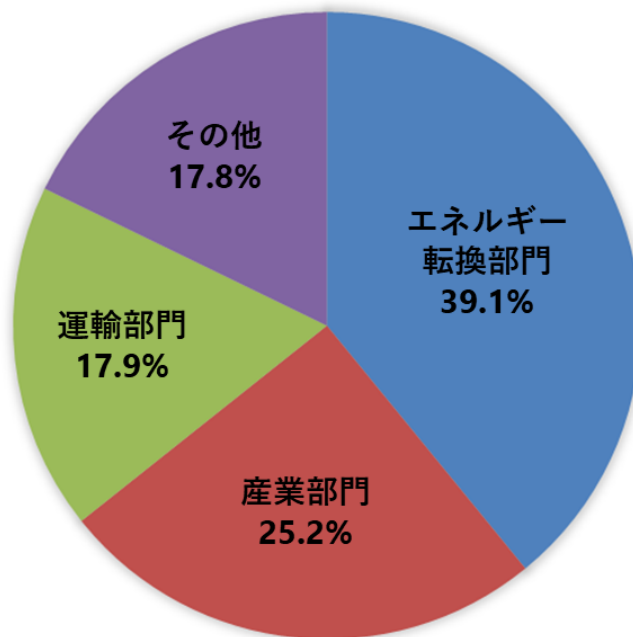


Fig.1.3 Percentage of CO<sub>2</sub> emissions by sector in Japan<sup>(5)</sup>

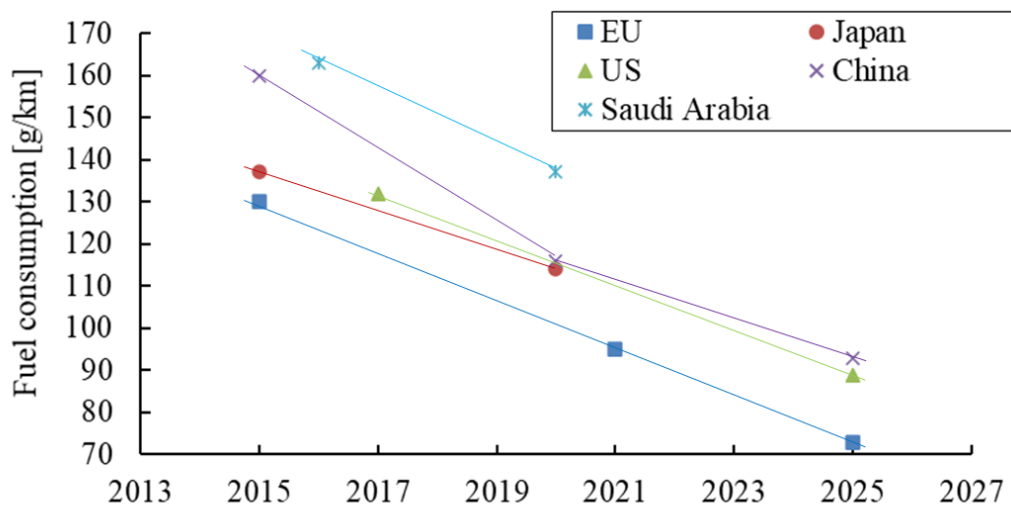


Fig.1.4 Fuel efficiency regulations in each country / region<sup>(6)</sup>

自動車の燃費改善に向けては種々の研究開発が進められており、日本自動車工業会にて主な燃費改善技術がまとめられている<sup>7)</sup>。内燃機関の性能が大きく影響することはもちろん、他にも駆動系の改良、車体の空気抵抗の低減、タイヤのころがり抵抗の低減などが挙げられる。また、信号待ちなどの停車時にエンジンを停止するアイドリングストップも燃費改善に寄与する。

続いて、燃費に大きく影響する内燃機関の図示熱効率について述べる。自動車で用いられる内燃機関は火花点火機関と圧縮着火機関に大別されるが、本論文では火花点火機関に焦点をあてる。火花点火機関は、ピストン圧縮された燃料-空気の混合気を点火して燃焼させる機関であり、熱力学的にはオットーサイクルで表現できる。オットーサイクルの  $p - V$  線図を図 1.5 に示す。図 1.5 において、断熱圧縮([1]→[2])、等容燃焼([2]→[3])、断熱膨張([3]→[4])、等容放熱([3]→[4])で構成され、理論効率 $\eta_g$  は式(1)で表される。ここで $\varepsilon$ は圧縮比、 $\kappa$ は比熱比を示す。一般的に混合気を希薄化するほど比熱比が高くなるため、理論効率は向上する。

$$\eta_g = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (1)$$

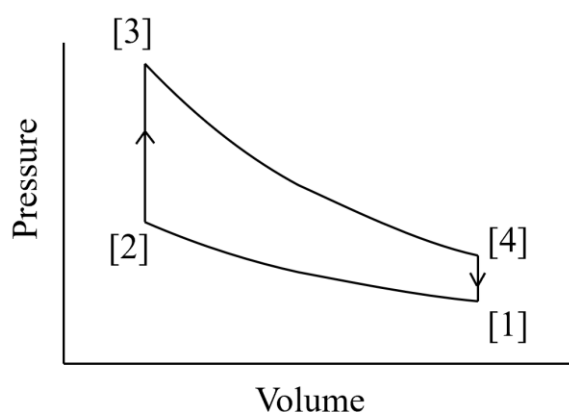


Fig.1.5  $p - V$  diagram of Otto cycle

図示熱効率は式(1)で示した理論効率から各種損失を考慮した値となる。代表的な損失として下記3点が挙げられる。

(1) 冷却損失

内燃機関ではエンジン筐体が損傷しないよう所定の温度以下で保たれており、燃焼ガスの熱エネルギーが燃焼室壁面から逃げることで冷却損失が生じる。希薄燃焼により燃焼温度を下げることで冷却損失を低減できる。

(2) 時間損失

燃焼反応が完了するには有限の時間が必要であるが、ピストン運動の速度に対して無視



できないことがほとんどである。燃焼中の容積変化が大きいほど得られる仕事量は小さくなり、等容燃焼時に得られる仕事量との差分が時間損失に相当する。

### (3) ポンプ損失

ポンプ損失は混合気の吸気および排ガスを排出する際の空気抵抗による損失である。特に吸気時の損失が大きく、絞り弁で吸気圧力を調整して負荷制御を行うため低負荷ほどポンプ損失は増大する。希薄燃焼とすることで、負荷が同等でも吸気圧力を上げられるためポンプ損失は低減する。

以上のように、図示熱効率を向上させるためには理論効率の向上および各損失の低減が必要であり、いずれも希薄燃焼が効果的である。しかしながら希薄燃焼では燃焼速度が低下するため時間損失の増大が大きな課題となる。燃焼速度を確保しつつ希薄燃焼を実現する方法としては、燃焼室内を高流動化する方法と予混合圧縮自着火（Homogeneous-Charge Compression Ignition :HCCI）燃焼させる方法が提案されている。

燃焼室内を高流動化する方法に関しては、国家プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program :SIP）の「革新的燃焼技術」として 2014 年～2018 年にかけて集中的に研究が行われ、最大熱効率 50%を実証している<sup>(8)</sup>。SIP では、希薄燃焼とすることで燃焼温度を 2000 K まで低減し冷却損失を大幅に低減することに成功している。燃焼速度の低下による時間損失の増大に対しては燃焼室内で強いタンブル流動を発生させることで課題を解決している。運転条件としては空気過剰率 2.0 以上で、タンブル流動で生成するプラグ近傍での平均流速 20～50 m/s である<sup>(9)</sup>。このような高流動および希薄燃焼においては一般的に使用されている点火コイルによる着火が困難であるため、点火コイル 10 個を連結したスーパー点火を用いて着火している。一方で、高い放電エネルギーを供給すると点火コイルの巨大化が避けられず、エンジンボアが小さく吸排気バルブの径が大きいほど設置スペースが限定されるため、点火コイルのサイズの問題が顕著になる。さらに、高い放電エネルギーを供給するための点火プラグにおいてもイリジウムなどの貴金属を採用しても電極消耗が避けられず、頻繁に交換することが求められる。SIP の取り組みで熱効率 50%の道筋が示されたものの、実用化に向けてはサイズや電極消耗なども考慮した点火方法の確立が必要である。

上述した高流動化とは異なる方法で希薄燃焼を実現する HCCI 燃焼について説明する。図 1.6 に火花点火および HCCI 燃焼の違いを示す<sup>(10)</sup>。火花点火では吸気した予混合気を火花放電にて点火、火炎核を生成し、火炎伝播させることで混合気を燃焼させる。一方で HCCI 燃焼では、希薄予混合気を高圧縮比で圧縮することにより燃焼室内全域で一気に自着火させるため、火炎伝播しないような希薄条件でも短時間で燃焼を成立させることが可能となる。HCCI 燃焼における大きな課題の一つに運転領域が限定されることが挙げられる。高負荷時には急峻な燃焼が運転領域拡大の妨げとなっており、HCCI 燃焼においても火花点火機関と同様の高周波振動を伴う異常燃焼が起こることが知られている<sup>(11)</sup>。一方、低負荷時にはサイクルごとの燃焼変動の増大や失火などが生じる。高負荷および低負荷の両方にお

いて課題があり，運転可能範囲が空気比や吸気温度によって大きく限定されるため大部分の運転領域を従来の火花点火方式に切り替えて運用することになる．上記課題に対して燃焼室にオゾンを供給することで HCCI 燃焼を促進する方法が提案されており，希薄限界の拡大および必要な吸気温度の低減効果が報告されている<sup>(12)(13)(14)(15)</sup>．しかしながらオゾン濃度が HCCI 燃焼に与える影響については研究がなされているものの，実際のエンジンへの適用を想定したオゾン発生方法の議論や吸気温度および湿度がオゾン発生量に与える影響の評価などはなされておらず，実用化の検討には踏み込まれていない．また，HCCI 燃焼では点火ではなく圧縮自着火させるため，着火タイミングを細かく制御できないデメリットもある．そのため，急加速時などで負荷が急変した場合は意図したタイミングで自着火せず，場合によっては失火に至る．運転領域が限定されるだけでなく負荷変動時の燃焼の不安定化も課題である．

以上，希薄燃焼を実現する手段として高流動化および HCCI 燃焼について説明した．本論文では前者の高流動および希薄燃焼における点火を中心に議論を進め，5 章にて HCCI 燃焼の課題を取り扱った研究結果を示す．

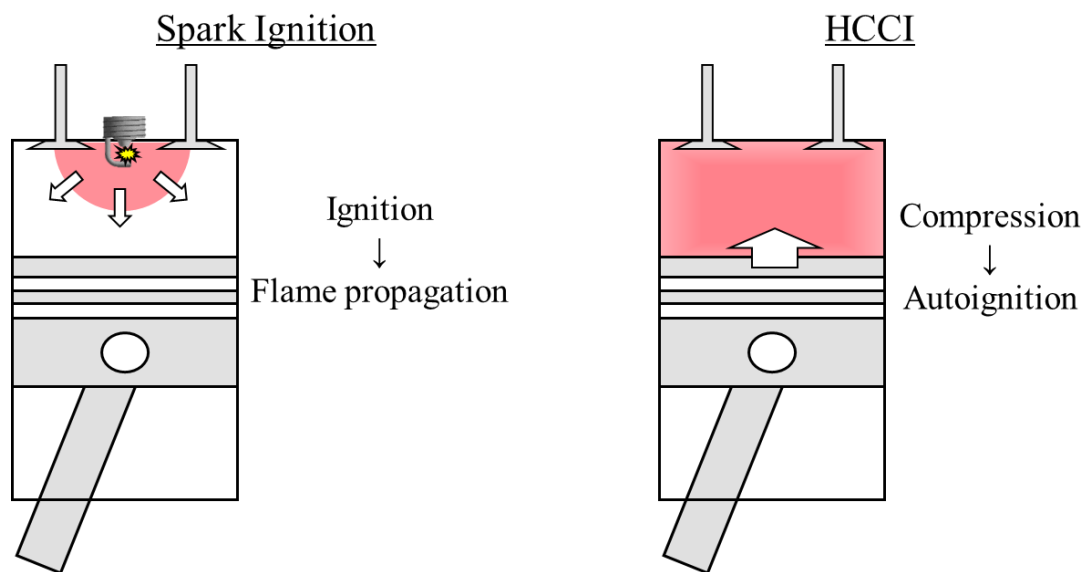


Fig.1.6 Difference of combustion mechanism between Spark ignition and HCCI

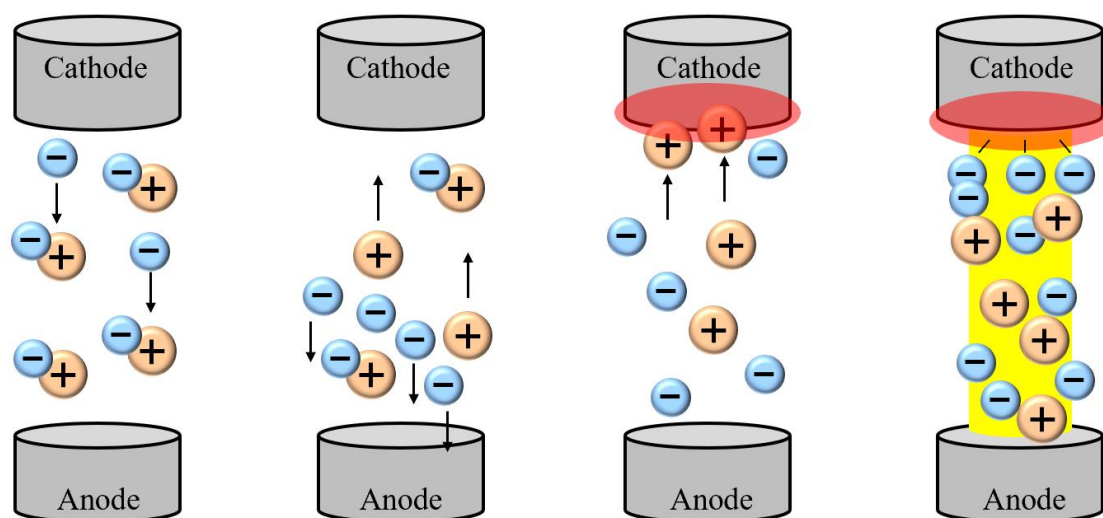
## 1.2 着火現象

前節で示した高流動化により希薄燃焼を実現するには、確実に混合気を点火する必要がある。本節では、火花放電による着火現象に焦点をあてて記述を進める。なお、本論文では着火を現象ととらえ、着火を引き起こす能動的な行為に相当するものを点火として両者を区別する。

着火とは燃料および酸化剤が混在する場において、燃焼の連鎖反応が開始する現象である。燃料と酸素の総括反応で考える場合には温度を代表とする熱的条件でのみ着火現象を説明することが可能であり、現在の点火装置では火花放電が熱源となる。着火に至る主要なプロセスとして放電の発生、放電路における初期火炎核の形成、および初期火炎核の成長が挙げられる。火花放電では放電路が数千度レベルの高温となるため、放電路における初期火炎核の形成は通常問題とならない。よって、火花放電を着火源に使用する場合は放電の発生および初期火炎核の成長が重要となる。第一のプロセスである放電発生メカニズムについて、生成されるプラズマの概論と併せて説明する。

図 1.7 に放電発生メカニズムの概略図を示す。例えば、空気中に配置された 2 つの電極に十分な電位差を与えた場合、電極間に存在する偶存電子や負イオンからの離脱で発生したわずかな初期電子が電界強度に応じて陽極に向かって加速される(図 1.7 (a))。加速された電子が電極間の気体分子に衝突し、気体分子を電子とイオンに電離する。当然、電離された電子も電界中に存在するため、同じように陽極に向かって加速しさらに多くの気体分子を電離する。連鎖的に電離が生じることで電極間では指数的に電子が増大することとなり、この現象は電子なだれと呼ばれる(図 1.7 (b))。電極間には同時に多数のイオンが発生しており、電子が陽極に向かって加速するのと同様にイオンは反対側の陰極に向かって加速される。このとき、両者の質量差が大きいため、イオンは電子よりも十分に長い時間をかけて加速する。イオンが陰極に衝突することにより陰極が加熱され熱電子放出を始めるため(図 1.7 (c))、熱電子放出と陰極の加熱が継続的に生じ、電極間に大きな電流が流れる状態になる(図 1.7 (d))。以上が、放電が発生するメカニズムであり、図 1.7 (d)の状態を一般的にアーク放電と呼ぶ。

以上、基本的な放電発生メカニズムについて述べた。次に、生成されるプラズマについて説明する。プラズマとは広義的には気体を構成する分子が電離し、イオンと電子に分離して運動している状態を指す。気体分子が十分に電離している場合は電子の温度とイオンの温度がほぼ均衡し、平衡となっている状態を熱プラズマまたは熱平衡プラズマと呼ぶ。一方で、電離度が低く、電子の温度とイオンの温度が平衡でない状態のプラズマは非平衡プラズマと呼ばれる。図 1.7 において、(a)は気体、(b)は非平衡プラズマ、(d)は熱プラズマであり、(c)は遷移過程と言える。非平衡プラズマでは電子温度のみが高いことにより、反応性の高い種々の化学活性種を多量に生成する特徴をもつ。すなわち、周囲の化学反応にも影響を及ぼすため、非平衡プラズマを扱う際には、電子衝突、放電、化学反応、ガス温度の上昇といった非常に広い時間スケールで生じる様々な現象に影響を与え得る。



(a) acceleration (b) electronic avalanche (c) heating cathode (d) arc discharge

Fig.1.7 Mechanism of discharge

電極間で放電が発生したのちに放電路の温度上昇によって初期火炎核が形成され、初期火炎核は周囲に火炎伝播することで成長する。流動のない静的な環境下では、火炎伝播は火炎帯における熱伝導が支配的な要因であり、概ね熱輸送によって現象を説明することができる。例えば、燃焼室の中心に球状の初期火炎核が与えられた場合を想定する。初期火炎核と周囲の未燃混合気との熱交換により初期火炎核は温度が低下し、周囲の未燃混合気の温度は上昇する。このとき、未燃混合気が所定の温度に到達した場合に燃焼が開始され、発熱反応が開始した部分が新たな熱源となり、さらに接触する未燃混合気に対して同様の過程が繰り返されることで火炎伝播が成立し初期火炎核が成長する。

火花放電が発生した後、初期火炎核が火炎伝播することによる発熱反応と、初期火炎核から電極への冷却損失のバランスにより初期火炎核が成長する速度が決まる。理論空燃比のような火炎伝播速度が十分に速い燃焼条件においては、電極への冷却損失の影響が相対的に小さくなるため初期火炎核は短い時間で成長する。一方、希薄燃焼では火炎伝播速度が遅いため電極への冷却損失の影響を強く受け、初期火炎核の成長に時間を要する。よって、希薄燃焼では着火遅れ時間の増大や初期火炎核の消失を引き起こす。単純に火花放電のエネルギーを高めることで着火遅れ時間を短縮し着火の確実性を高めることができるが、電極消耗の問題が生じる。電極を過度に消耗することなく燃料が希薄な条件でも確実に着火する方法として、より大きな初期火炎核を形成する方法が考えられる。従来のような直線的な放電路ではなく、より広い範囲に放電を発生させ体積的に点火することでより大きな初期火炎核を形成でき、電極への冷却損失を相対的に小さくすることができる。初期火炎核が点火プラグ電極部よりも十分に大きく成長した後に流動やピストン膨張により火炎が消失する

ことがあるが、その場合は着火したがその後失火した、という表現がより正確であると考ええる。

上述した放電および電極への冷却損失に対して、電極形状がどのように影響するかを述べる。電極部において着火に大きく影響するのは電極間の距離に相当する放電ギャップと、中心電極の直径である。放電ギャップが狭い場合には、電極間で発生する火花放電により生じる初期火炎核が、電極への冷却損失の影響を強く受けて消失する。冷却損失の概略図を図 1.8 に示す。反対に放電ギャップが広い場合には放電に必要な電圧が高くなり、場合によっては電圧不足で放電が発生しないリスクが生じる。中心電極の直径についても放電ギャップと同様のトレードオフが存在する。直径が大きい場合には放電ギャップが狭い場合と同様に電極への冷却損失が大きくなり、初期火炎核が消失するリスクが高まる。一方で、直径が小さい場合には電極消耗の問題が生じる。例えば、同じ投入エネルギーで同じ体積量の電極が消耗すると仮定した場合、電極直径が小さい方がより少ない放電回数で放電ギャップが拡大する。よって、点火プラグの寿命が短くなるために短期間で点火プラグを交換する必要が生じる。電極の消耗は点火に放電が利用され始めた段階から大きな課題として認識されており、消耗メカニズムの研究も古くから行われている<sup>(16)</sup>。2000 年頃からは中心電極をイリジウムなどの貴金属にした点火プラグが採用され始め<sup>(17)</sup>、電極消耗の問題はある程度解消されたが、必ずしも十分とは言えず依然として課題が残る。以上で述べた放電ギャップと中心電極の直径におけるトレードオフの関係を図 1.9 にまとめる。

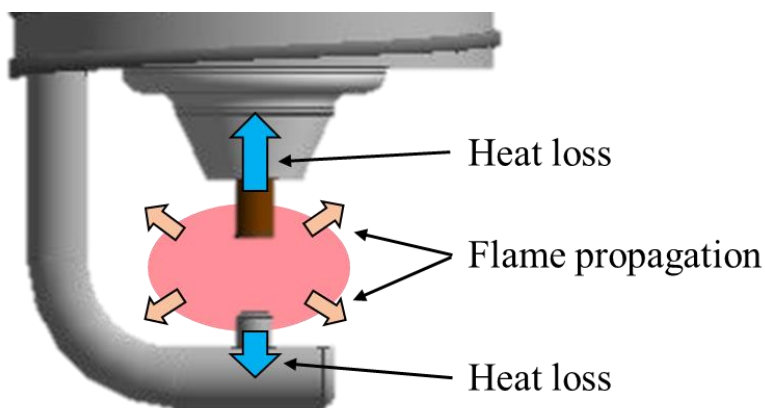


Fig.1.8 Schematic diagram of flame propagation and heat loss by electrode

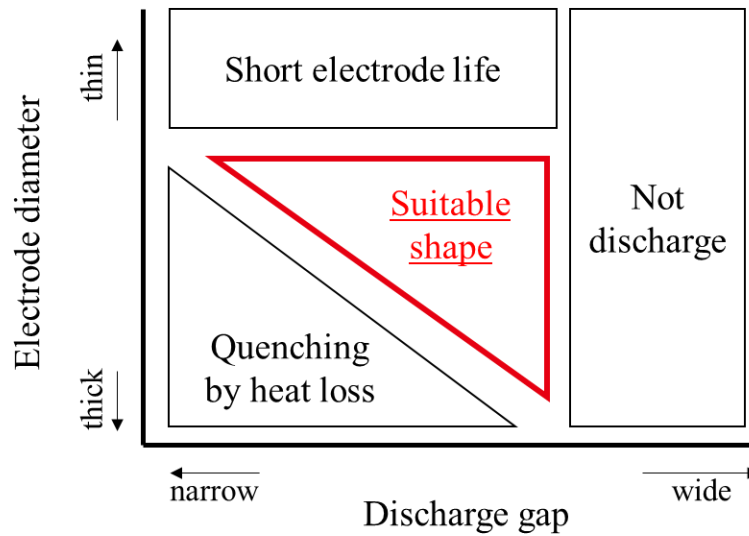


Fig.1.9 Suitable shape of discharge gap and electrode diameter

以上、放電および初期火炎核の成長について説明したが、流動の無い静的な環境を想定したものである。実際のエンジンでは強い流動が生じているため、流動の影響を考慮する必要がある。例えば、流速が 10 m/s の環境で火花放電が 1 ms の間持続したとすると、火花放電の開始から終了までの期間に混合気は 10 mm 流れることとなる。一般的な放電ギャップ約 1 mm に対して約 10 倍に相当し、放電現象のみを対象としても決して無視できない影響である。流動環境下で発生した火花放電は、発生後に下流方向へ伸長し、弓状の放電路を形成する。流動がより強い場合には再放電により放電路が変化する現象も知られている<sup>(18)</sup>。図 1.10 に示すように初期火炎核は電極による冷却損失の影響が小さい放電路の中腹で形成されやすいため、初期火炎核の大きさや形状は形成された放電路によって決まる。さらに、再放電が生じた場合には初期火炎核が分断されるため大きな初期火炎核は形成されにくく、着火の確実性を低下させる。しかしながら、放電が伸長し再放電する現象はいまだ不明瞭な点が多く解明を目的とした種々の研究が進められている。

例えば、放電の挙動に対する実験的な研究例では、定容容器を用いて気体の温度や成分に対する放電電圧や放電路が伸長した際の電圧波形について実験式を提案した例<sup>(19)</sup>、放電の電圧および電流を計測し最大 18 atm 下でのアーク放電およびグロー放電の挙動を調べた例<sup>(20)</sup>などがある。また、放電路の電気抵抗値を予測する式としては Kim らの式<sup>(21)</sup>が広く用いられており、佐山らは Kim らの式を詳細に検証し修正式を提案している<sup>(22)</sup>。特に計測に重きを置いた研究としては、放電および初期火炎核の発光スペクトルをとらえた研究例<sup>(23)</sup>や、放電による圧力上昇などから混合気へ与えられたエネルギーを計測するカロリメータ法を用いた研究例<sup>(24)</sup>などがある。エンジンでの燃焼性と併せて議論した例として、放電路の伸長と EGR(Exhaust Gas Recirculation)率限界との関係に着目した研究例<sup>(25)</sup>や、放電持続時間と希薄燃焼限界との関係に着目した研究例<sup>(26)</sup>があり、可視化を試みた研究例も報告

されている<sup>(27)(28)(29)(30)</sup>。また、数値解析を対象とした研究として、放電路の挙動についてモデル化を試みた例<sup>(31)(32)(33)</sup>がある。

以上のように、火花放電の挙動に関しては様々な角度から研究が進められている。しかしながら、影響因子が数多く存在することもあり、先述した複雑な現象を正確に把握するにはそれでも十分とは言えないのが現状である。特に、再放電を繰り返す火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性は初期火炎核の形成を議論する上で非常に重要であるが、詳細に調査した研究例は見受けられない。

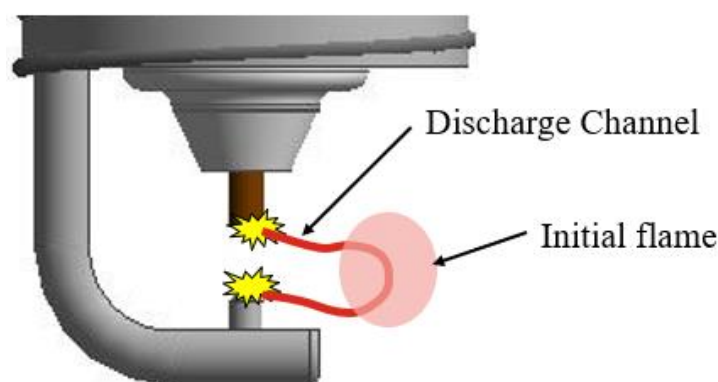


Fig.1.10 Schematic diagram of ignition under flow condition

### 1.3 先行研究

1.2 節で述べたように希薄燃焼では初期火炎核の成長に長い時間を要するため着火遅れ時間を増大させ、高流動下においては複雑な火花放電の挙動によりさらに着火の確実性を低下させる。そこで従来の火花放電点火に対する新たな点火方法が提案されている。

特に希薄燃焼での着火性改善を主な目的として、従来の火花放電で発生させたプラズマに対して追加でエネルギーを与えて、プラズマを成長させる点火方法が提案されている。例えば、芹澤ら火花放電を発生させる回路と並列に高周波回路を追加し、電極間で火花放電を起こした後に高周波の電流を流してプラズマを成長させるアクティブ着火を提案している<sup>(34)</sup>。また、電流ではなくマイクロ波をプラズマに照射してプラズマを成長させる点火方法も研究開発が進んでいる<sup>(35)(36)(37)(38)(39)</sup>。先述した例では希薄限界が延びることが実証されているが、点火装置が複雑化することや電極消耗などが課題となり得る。また、プラグ内部の抵抗を小さくする必要があるため、ブレイクダウン時の電磁ノイズの影響も実用化に向けては無視できない問題になると考えられる。

エンジン構造と組み合わせた試みとしては、新たに設けた副室にインジェクタおよび点火装置を配置するプラズマジェット点火が挙げられる<sup>(40)(41)</sup>。副室内で燃料噴射および点火することにより、オリフィスを通して副室から主燃焼室へ火炎を噴射して点火する方法である。高温の既燃ガスの噴射により燃焼時間の短縮が期待でき、さらに点火装置としては従

来の火花放電でも成り立つ。しかしながら、エンジン構造の複雑化や、噴射時のオリフィス壁面への冷却損失が課題となる。

従来の火花放電点火に対して、比較的簡素な追加構成をもって電流波形を能動的に調整する点火方法も提案されている。例えば、従来の減衰電流波形を複数に分けて与えることで電流を長時間保持する例<sup>(42)</sup>や、任意のタイミングおよび期間で電極間に直流電流を流し込む例がある<sup>(43)</sup>。点火方法が従来から大きく変わらない点は実用的と言えるが、やはり電極の消耗が課題として残ると考えられる。

また、体積的な点火を試みた例として、複数電極に対してそれぞれ放電を発生させる研究もある<sup>(44)</sup>。本例では3対の電極に対してコンデンサ放電させており、希薄燃焼時に燃焼時間が短縮された報告がなされている。しかしながら、1か所で放電が発生すると浮遊容量が変化するため2つ目以降では放電タイミングが遅延することや、プラグが大きくなる点がデメリットである。

一方で、放電ではなくレーザーでプラズマを生成して点火する全く新しい点火方法の研究開発も進んでいる<sup>(45)(46)(47)</sup>。燃焼室内において、レーザー光を集光することでブレイクダウンを引き起こし、高温プラズマを生成して混合気を点火する方法である。放電による点火に対して有利な点として、燃焼室中心で点火できることが挙げられる。点火プラグを用いた場合は着火起点が壁面付近に限定されるため、点火プラグと反対側の壁面まで火炎伝播するのに時間を要する。一方で、レーザー点火では燃焼室の中心で着火できるため燃焼時間の点で有利となる。また、電極が不要であるため、電極消耗や電極への冷却損失などの影響を無視できるのも大きな利点である。他にも、圧力が高いほどブレイクダウンを起こしやすい特徴も今後の高圧縮比化のエンジントレンドと相性が良いと考えられる。以上のようにレーザーによる点火は様々な利点を有するが、点火装置が大型化、高コスト化することが大きな課題である。また、希薄燃焼や高流動環境においては大きなエネルギーを要するため、レーザーの高出力化やマイクロ波と組み合わせた研究などが進められている<sup>(48)</sup>。

ストリーマ放電やコロナ放電に分類されるような非平衡プラズマを活用した研究もなされている。非平衡プラズマを用いた点火方法は、数百ナノ秒以下の極めて短い時間のみで電極に高電圧を印加し、大きな電流が流れる前に放電を停止させることで非平衡プラズマを生成して点火する方法である。当然、放電一回あたりの消費エネルギーは従来の火花放電よりも小さくなるため、放電を繰り返し発生させることで混合気を点火する。プラズマ支援点火および燃焼技術<sup>(49)(50)(51)</sup>の主要なテーマの一つとして、電極形状や与える電圧波形、あるいは繰り返し方法など、様々な条件下での点火の研究が進められている<sup>(52)~(65)</sup>。非平衡プラズマを点火に利用した場合の大きな利点の一つは複数の放電路で放電を発生させることができ、体積的な点火が可能となる点である。もう一つの利点は電極消耗が少ない点である。従来の火花放電では熱プラズマであるアーク放電を形成するため電流値に応じて電極が消耗するが、非平衡プラズマでは陰極の温度がほとんど上昇せず、電極消耗が大幅に抑えられる。すなわち、体積的かつ繰り返しの非平衡プラズマを発生させることができれば、電極を消



耗することなく従来よりも大きなエネルギーを投入することが可能である。一方で、エンジンに適用した際に大きな課題となるのは安定して非平衡プラズマを生成することが難しい点である。低い圧力下では電子の平均自由行程が長く、電離度も低いため非平衡プラズマを形成しやすいが、大気圧以上では非常に短い時間で熱プラズマに遷移する。熱プラズマへの遷移を抑制する方法の一つは、高圧力下においても熱プラズマに遷移しないほど短い時間のみで電極間に高電圧を発生させることである。最もシンプルな方法は高電圧パルス電源を用いる方法であり、例えば以下のような方法、デバイスを採用した電源方式が提案されている。

#### (1) Marx Generator <sup>(66)</sup>

複数並べたコンデンサを所定の電圧で並列に充電し、スイッチングにより瞬間的に直列に切り替えることで高電圧パルスを発生させる方式である。放電によりスイッチングするギャップスイッチ方式が古くから利用されてきたが、近年では半導体に置き換えたものが多く提案されている。コンデンサの充電電圧と直列数の積が最大電圧であるため、例えば 1kV の充電電圧で 20kV を出力しようとする最低でも 20 個のスイッチング素子が必要となる。

#### (2) Linear Transformer Driver :LTD <sup>(67)</sup>

昇圧トランスの 1 次側でスイッチング素子を並列に配置し、電圧を重ねることで 2 次側に高電圧パルスを発生させる方式である。各スイッチング素子を制御することで出力電圧を調整することができ、パルス波形の自由度が高いことが特徴である。一方で、上記(1)と同様に相当数のスイッチング素子が求められ、さらに昇圧トランスに用いるコアの磁気を出力の度にリセットする必要がある。

#### (3) Pulse Forming Network :PFN <sup>(68)</sup>

インダクタンス  $L$  および静電容量  $C$  が同軸ケーブルのような分布定数線路となるパルス整形回路 (PFN) を用いた電源である。例えば、現行の点火装置の出力部に後付けで追加する構成が可能であるが、高電圧に対して同軸線路を設ける必要があり幾何学的な制約が大きい。また、負荷インピーダンスの影響を大きく受けるため、放電のような時間的に急変化する負荷には適用が難しい。

#### (4) Semiconductor Opening Switch :SOS <sup>(69)</sup>

電流の遮断のみを行うオープニングスイッチ用の特殊ダイオードを用いた方式である。パルストランスと組み合わせた回路構成とすることが多く、2 次側に配置されたダイオードの逆回復特性を利用して瞬時に導通電流を遮断することで高電圧パルスを発生させる。比較的容易に数十ナノ秒までパルス幅を小さくすることができるが、上記(1)および(2)のような矩形波ではなく山なりの波形が得られる。また、パルストランスの磁気のリセットが必要となるため高周波化には工夫が必要である。

上述したように高電圧パルス電源は様々な方法が提案されているが、多量のスイッチング素子を要する、あるいは放電負荷に不向きであるため、点火方法への適用は容易ではない。また、一度の点火において繰り返し非平衡プラズマを発生させることを想定すると数 kHz は必要となるため、上記(4)の方式も容易ではないと考える。

以上で述べたように従来の火花放電点火に対して様々な点火方法が提案されているもののいずれも課題を抱える。そこで本研究では、電極を消耗することなく体積的な放電が可能な非平衡プラズマを用いた点火方法に着目し、高電圧パルス電源を用いることなく高い圧力下でも安定して非平衡プラズマを生成可能な誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge :DBD) を用いた点火に関する研究を行う。DBD の原理は 4 章にて詳細に説明するが、少なくとも片方の電極を誘電体で覆って交流電圧を印加することにより非平衡プラズマを生成する方法である<sup>(70)</sup>。介在した誘電体が絶縁破壊しない限りアーク放電には至らず、また、電極形状を変更することで放電路を調整することが可能である。以上のような特徴により、比較的簡素な装置構成をもって、投入エネルギーを増大しても電極消耗のない点火が実現可能と考えられる。

しかしながら、DBD を用いた点火は、従来とは異なる特殊な点火プラグが必要という背景もあり、DBD の特性や着火過程については十分に解明されていない。これまでに DBD 点火を試みた研究例として、白石らはガス密度の高い領域においてスパーク点火よりも着火遅れ時間が短縮する結果を報告している<sup>(71)</sup>。また、Starikovskaia らは、大気圧下の DBD では空間的に均一な放電状態となるが、高圧力下では強い発光を有するフィラメント状の放電状態となることを報告している<sup>(72)(73)</sup>。しかしながら、DBD 点火では圧力の影響を大きく受ける傾向が示されているものの、希薄燃焼における点火特性については評価されていない。また、着火過程についても詳細な議論が必要である。

本研究では、定容燃焼容器を用いて希薄燃焼時における DBD 点火の特性を明らかにし、可視化により詳細な着火過程を議論する。得られた結果をもって DBD 点火の可能性を示す。また、DBD には点火とは別の活用方法としてオゾンの発生源に使用できるため、HCCI 燃焼の促進にも応用できる。HCCI 燃焼への応用に向けた試みについては 5 章で詳細に述べる。

#### 1.4 本論文の目的と構成

前節までに述べてきた内容をまとめるとともに、本論文の目的と構成を述べる。

地球温暖化への取り組みに向けて内燃機関の燃費改善は依然として社会的な意義があり、継続した研究開発が必要である。燃費改善に効果的である希薄燃焼を実現する方法として、燃焼室内を高流動化する方法と HCCI 燃焼させる方法が提案されている。

前者の高流動化する方法に関しては国家プロジェクト SIP にて熱効率 50%が実証され、それに至る道筋が示された。一方、高流動および希薄燃焼においては、従来の点火装置では着火の確実性が確保されないことから、多量の点火コイルを連結させて大電流を流す方法が用いられている。しかしながら、大電流によって電極が激しく消耗し、点火装置も巨大化するため実用的ではなく、高流動下における火花放電の挙動も十分に解明されているとは言えない。高流動および希薄燃焼においても確実に着火でき、かつ、比較的簡素な構成で電極消耗の少ない点火方法が求められている。

そこで、電極が消耗せず体積的な放電が可能な非平衡プラズマを用いた点火方法に着目し、比較的簡素な構成で非平衡プラズマを生成できる DBD に着目した。しかしながら、DBD により混合気を点火した例は少なく、詳細な放電および着火メカニズムは分かっていない。本論文では、DBD を用いた新たな点火方法の可能性を示すために、これまでに判明していない希薄燃焼時の特性を明らかにする。さらに、得られた可視画像から着火メカニズムについて考察し、着火性改善に向けて議論した内容をまとめる。

本論文の構成を述べる。まず 2 章では、高流動下における点火で重要となる初期火炎核の形成過程を議論するために、先行研究で明らかにされていない再放電を繰り返す火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性について調査を行う。続いて 3 章では、2 章で得られた結論をもとに一定の周期かつ一定の放電エネルギーで繰り返し放電が可能な多段パルス放電を構築し、単気筒可視エンジンにて従来の火花放電点火と比較して着火性が改善した結果を報告する。また、得られた可視画像をもとに多段パルス放電による初期火炎核の形成過程について議論する。4 章では定容燃焼容器を用いて希薄燃焼時における昇圧環境下での DBD 点火の特性を明らかにする。また、可視化により詳細な着火過程を議論し、着火改善に向けて議論する。5 章では DBD の異なる適用方法として HCCI 燃焼への応用に関する研究を行う。先行例では議論されていない、実際のエンジンへの適用を想定したオゾン発生具体的な方法や吸気温度および湿度がオゾン発生量に与える影響を明らかにし、DBD を用いて HCCI 燃焼を制御する試みについて報告する。最後に 6 章で本論文の結論を述べる。

## 第2章 定容容器を用いた火花放電挙動の分析

### 2.1 序論

内燃機関の燃費改善には希薄燃焼が有効であるが、燃焼速度が低下する課題がある。希薄燃焼時の燃焼速度を確保する手段として燃焼室内の高流動化が提案されている。しかしながら、高流動下における火花放電は下流方向への伸長および再放電を繰り返し、複雑な挙動となる。1章で述べたように高流動下における火花放電の現象を解明するための様々な研究が進められているが、点火装置の特性、混合気の状態、点火プラグ近傍の流動など、影響因子が多く存在することもあり十分に現象が解明されているとは言えない。特に、再放電により初期火炎核が分断され得ることを想定すると、火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性は確実な着火に対して非常に重要であるが、点火装置の特性と可視映像を用いて詳細に議論した研究例は見受けられない。

そこで本章では流速および燃焼条件を変化させた際の火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性を明らかにすることを目的とし、定容燃焼容器を用いた放電観察ならびに電圧および電流波形の分析を行う。高流動下で着火が可能な定容燃焼容器を用いて、まずは乾燥空気下における放電の挙動を高速カメラで撮影し、放電経路、電圧波形および電流波形を比較しながら現象の考察を行う。その後、流速および燃焼条件によって火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーがどのように変化するかを調査する。燃焼条件の影響評価においては空気比を変更した実験と、EGRを模擬するためにCO<sub>2</sub>を混合した実験を実施する。得られた実験結果を報告するとともに、高流動下で効果的な点火方法について考察する。

### 2.2 実験装置および方法

実験装置の説明に先立って、本章で取り扱う火花放電を発生させる点火装置について概略を述べる。点火装置は主にバッテリーから得られた電圧を高電圧に昇圧する点火コイルと、点火コイルで発生した高電圧を受けて燃焼室内で放電を発生させる点火プラグとで構成される。付録Aに記載するように点火装置はこれまでに少しずつ方式が変わっているが、本論文では現在主流となっているトランジスタ方式を対象とする。

トランジスタ方式の点火コイルの代表的な回路図を図2.1に示す。バッテリーの直流電圧に対して昇圧トランスの1次側およびトランジスタが直列に接続され、2次側に点火プラグが接続される。図2.2に示す代表的な動作波形を用いて点火コイルの動作を説明する<sup>(74)</sup>。図中上段から順に点火信号、1次電流、1次電圧、2次電圧、2次電流を示している。まず、点火信号がONとなることでトランジスタがONとなり、点火コイルの1次側に電流が流れて磁気エネルギーが蓄えられる。点火信号がOFFになると1次電流が遮断されることにより1次電圧が跳ね上がり、跳ね上がった1次電圧に対しさらに点火コイルの巻き数比倍の高電圧が点火コイルの2次側に発生する。一般的に点火プラグには負極性の電圧を印加し

た方がより低い電圧で放電できるため、点火コイルの 1 次側と 2 次側で基準電位に対して極性を反転している。点火プラグで放電が発生すると、2 次電圧は急激に下がり、2 次側に電流が流れ始める。2 次電圧が急激に下がる直前の電圧が放電開始電圧、下がった後の電圧が放電維持電圧に相当し、放電維持電圧は放電伸長の影響を強く受ける。また、基本的には 2 次電流の波形は点火コイルが有するインダクタンスが支配的となるため、放電が発生した直後が最も電流値が大きくその後は単調に減少する電流波形となる。厳密には、放電直後には容量性の放電が瞬間的に流れるが、ここでは放電エネルギーの大半を占める誘導性の放電に焦点を絞って説明している。点火プラグについては、実験に影響する部分のみを後述し詳細な内部構造については付録 B に記載する。

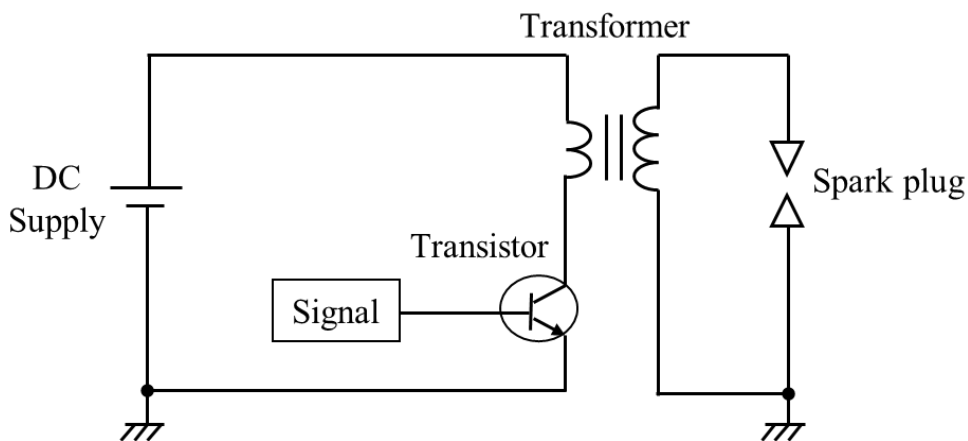


Fig.2.1 Circuit diagram of igniter for spark discharge

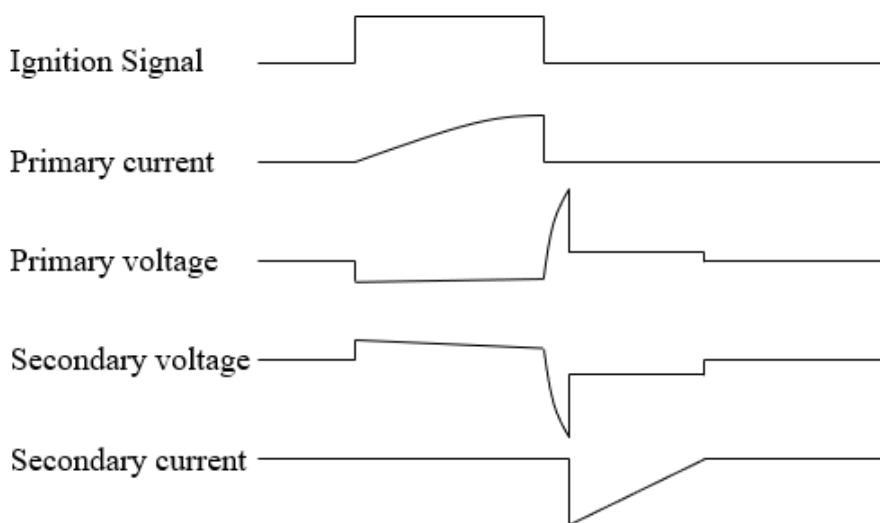


Fig.2.2 Typical waveform about operating an igniter

本章で使用する実験装置の概略図および燃焼容器周辺の外観写真を図 2.3 および図 2.4 にそれぞれ記載する。また、燃焼容器の図面および流動の方向とプラグの位置関係を示した概略図を図 2.5 および図 2.6 にそれぞれ記載する。燃焼室内部に直接攪拌機を取り付けて流動を発生させることも考えられるが、比較的先行例が多く、より高い流速を発生させやすい電磁弁を利用した方法を本実験では採用する<sup>(75)(76)(77)(78)</sup>。

まず、攪拌機を装着した混合容器(1,000cc)に乾燥空気、ブタン、および CO<sub>2</sub> を所定の割合で計 0.8 MPa で予め混合しておき、その後、電磁弁(ASCO 社製 JE32XJ262G202V)を用いて真空引きした燃焼容器へ噴き込む。電磁弁には応答速度の速い直動式のものを用いており、電磁弁および燃焼容器の間には電磁弁を保護するための逆止弁を配置している。燃焼容器(126cc)の内部は直径 40 mm、長さ 100 mm の水平方向を軸とした円筒形としており、両側面に石英ガラスが配置されている。燃焼容器の中心からオフセットさせた位置から混合気を噴き込むことにより内部で旋回流を発生させている。また、図 2.5 に示すように燃焼容器には熱電対および圧力センサを装着しており、燃焼後は排気口に取り付けたバルブを開いて排気する。

本実験では噴き込み時間を 50 ms で固定し、電磁弁を閉じてから放電させるまでの時間を変更することで流速を調整する。以上の構成により、流動下における放電および燃焼の様子を高速カメラで撮影する。高速カメラには Photron 社製の FASTCAM-SA-X2 を用いており、撮影速度および露光時間は 10,000 frame/s, 1/10,103 s とする。また、燃焼容器は室温とし、装着した燃焼圧センサにより、充填圧および燃焼圧を測定する。

現象を把握しやすくするため、プラグに最大約 250 mJ を供給できる高エネルギー仕様の点火コイルを用いる。点火コイルおよび点火プラグ間は抵抗が無視できる高耐圧ケーブルで接続しており、高電圧ケーブルにおける電圧および電流を測定する。測定器においては、電圧プローブには岩崎通信機社製 HV-P30A、電流プローブには Tektronix 社製 TCP303、オシロスコープには横河電機社製 DL7480 を用いた。点火プラグには放電ギャップ 1.1 mm、内部抵抗 4.2 k $\Omega$ 、両針形状の仕様を用いており、接地電極は風下 45 度となるように装着する。

図 2.7 は乾燥空気を噴き込んだ際に得られた燃焼容器内の圧力履歴である。横軸は電磁弁信号の立ち上がり時刻を 0 とした時の経過時間、縦軸は圧力および電磁弁信号を示している。電磁弁の信号から 15 ms ほどの遅延時間を経て圧力が上昇していることがわかる。一方、ピーク圧力に到達後わずかに低下する傾向が確認されたが、本章では経過時間による圧力差は無視できるものとし、0.22 MPa に統一して議論を進める。

点火プラグの電極間の流速を測定した結果を図 2.8 に示す。本章では、後述するシュリーレン撮影法で得られた画像を解析することで流速を算出しており、放電時期を変化させることにより流速の調整を行う。なお、燃焼容器の軸方向における流速成分の影響は無視できると仮定している。

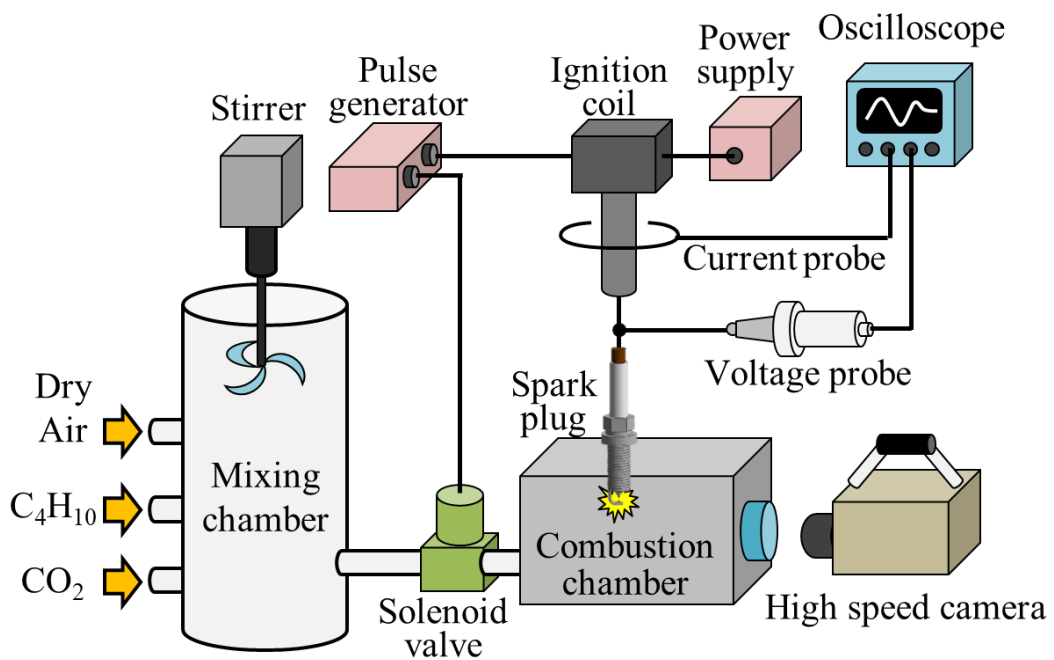


Fig.2.3 Schematic of experimental apparatus

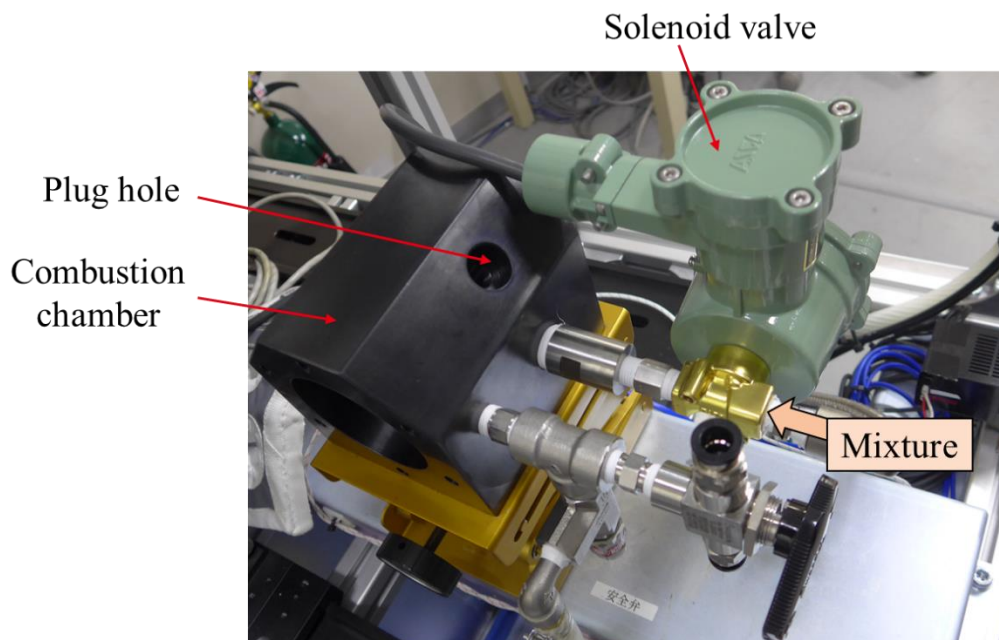


Fig.2.4 Photograph of combustion chamber and solenoid valve

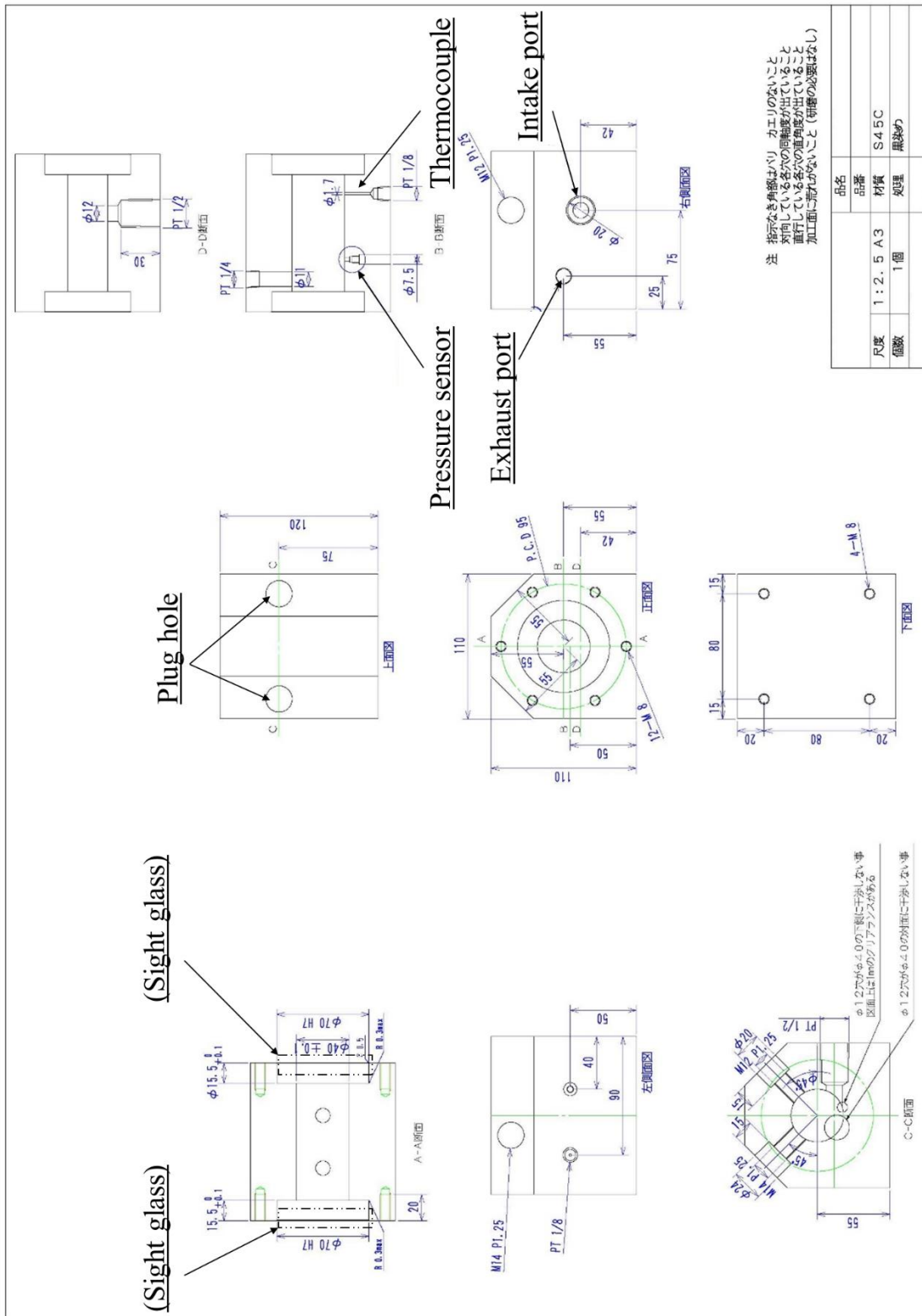


Fig.2.5 Drawing of combustion chamber



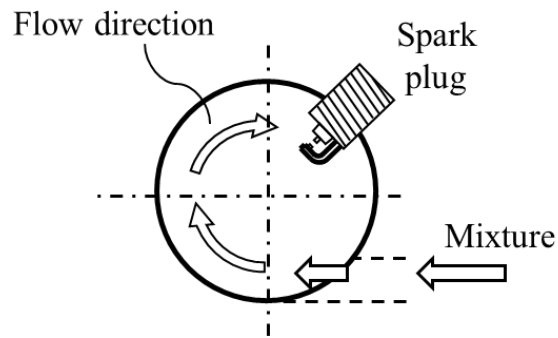


Fig.2.6 Relationship between flow direction and position of spark plug

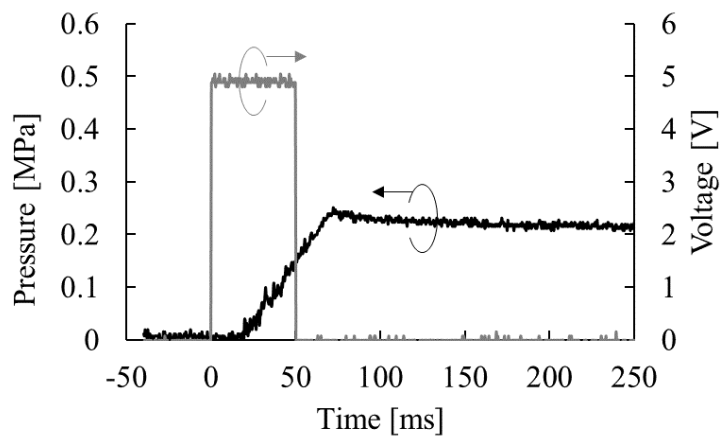


Fig.2.7 Change of pressure in combustion area after signal for solenoid valve

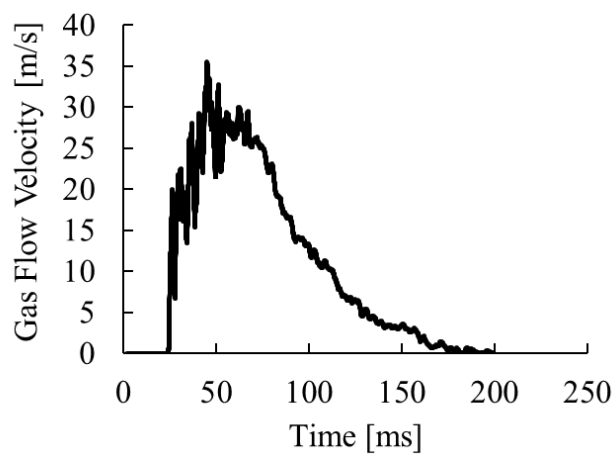


Fig.2.8 Change of gas flow velocity after signal for solenoid valve

ここで、流速計測の詳細について説明する。本実験では流速計測に PIV (Particle Image Velocimetry)法を用いるが、実験装置の都合によりトレーサー粒子の使用が困難であったため、シュリーレン撮影法で得られた画像の輝度分布をトレーサー粒子の代替えとして流速を算出することとした。図 2.9 を用いてシュリーレン撮影法の原理を説明する。点光源からの光をレンズにより平行光にし、被写体を通過させ、平行光をレンズで集光する。集光部に鋭利な面を有するナイフエッジを配置し、ナイフエッジの後段に配置したカメラで撮影する。被写体に密度勾配があると屈折率が変化し、屈折した光はナイフエッジで遮られるため、結果として密度勾配を陰影として撮影することが可能となる。

図 2.7 および図 2.8 で示した条件において、得られたシュリーレン画像を図 2.10 に示す。電磁弁信号の立ち上がり時を 0 として図中(a)~(d)に 40 ms, 80 ms, 100 ms, 150 ms 後の画像を示している。ここで、吸気口は画像右下に位置しており、水平方向左向きに噴出させているため時計回りの旋回流が発生している。また、高速カメラの撮影速度は 30,000 fps, 露光時間は 1/30,946 s としている。いずれの画像においても密度勾配を現す陰影が空間的に不均一に分布しており、陰影を画像解析することで点火プラグ近傍の流速を推定する。

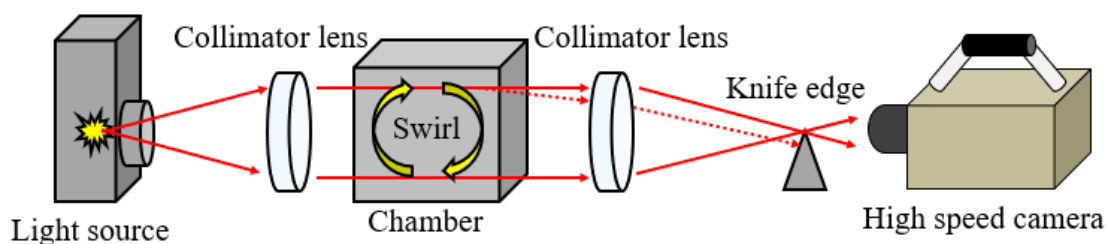


Fig.2.9 Schematic diagram of Schlieren photography

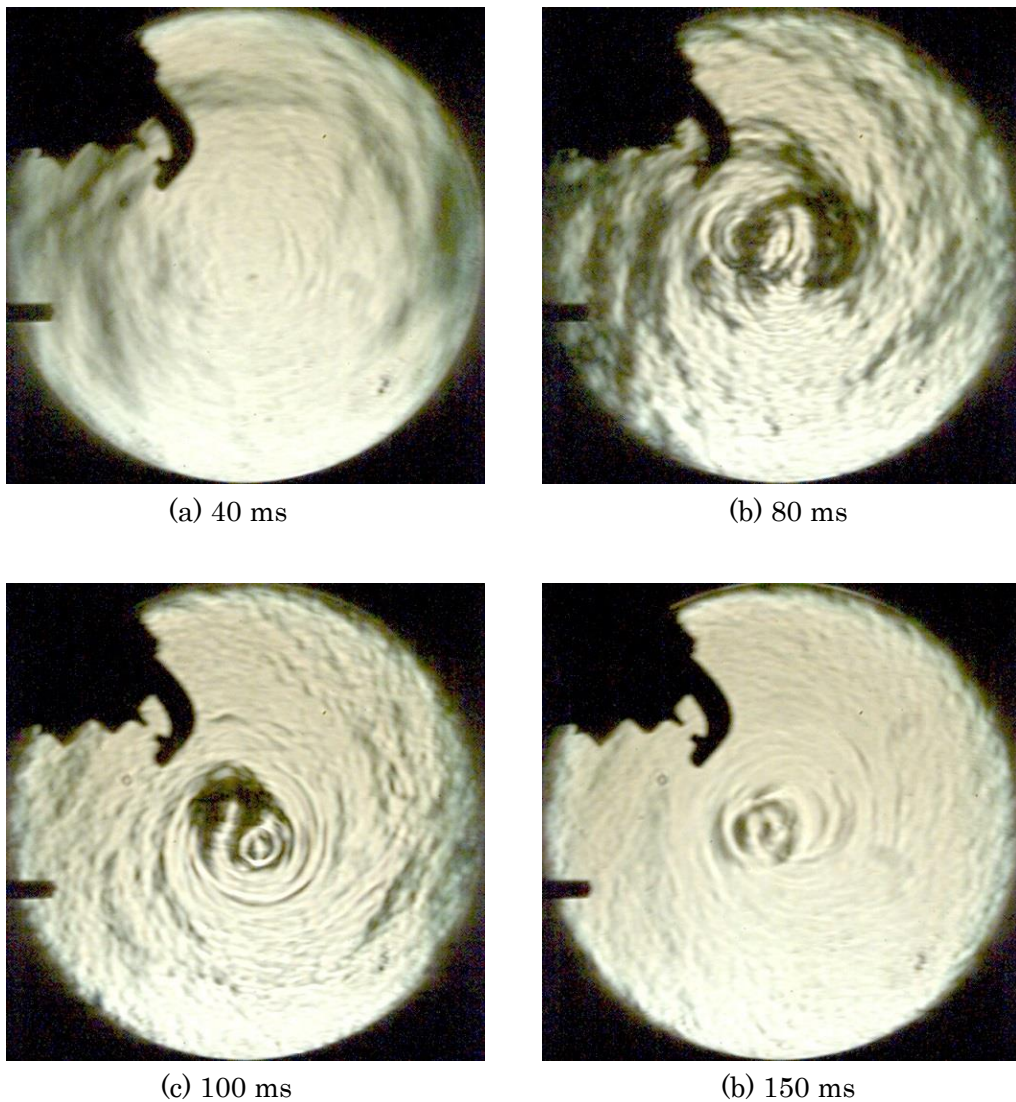


Fig.2.10 Schlieren images for measuring gas flow velocity

得られたシュリーレン画像群において、ピクセル毎の輝度を使って解析を行う。図 2.11 に画像解析の説明図を、表 2.1 に解析条件をそれぞれ示し、解析手順を以下にまとめる。

(1) 基準領域の設定

流速を求めたい領域を指定する。最も重要となるプラグ近傍においてはプラグの影により解析が困難となるため、同じ半径距離に位置する他の 4 箇所（図 2.11 中 A, B, C, D）で設定する。

(2) 探査領域の設定

上記(1)で設定した基準領域に対し、次フレーム画像（1/30,000 s 後）で最も輝度分布が類似する領域を探査することとなる。元画像全域を探査することも可能であるが、処理装置の負荷が高くなるため、各基準領域を中心に縦横 3 倍ずつの範囲で設定する。基準領域のサイズを踏まえて $(210 - 70) \times (210 - 70)$  pixel の範囲で探査するため、約 20,000 通りの選択

枝から最適解を割り出す。

(3) 類似領域の抽出

探査領域において、基準領域との比較対象である検査領域を 1 pixel ずつずらしながら類似判定を行う。類似判定には式(2)で表される相互相関係数 $C$ を用いており、値が最大となる領域が最も類似していると判定し、基準領域との距離から流速を推定する。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - f_m)(g_{i,j} - g_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - f_m)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - g_m)^2}} \quad (2)$$

ここで、添え字 $i, j$ は準領域の2軸の数値を、添え字 $m$ は平均値を示している。基準領域の $i, j$ における輝度を $f$ 、検査領域の $i, j$ における輝度を $g$ としている。なお、各領域は正方形としているため、 $i$ および $j$ の最大値は $N$ で統一している。

Table.2.1 Condition of image analysis

画像サイズ	600×600 pixel
基準領域	70×70 pixel
探査領域	210×210 pixel
類似領域の抽出	相互相関係数により判定

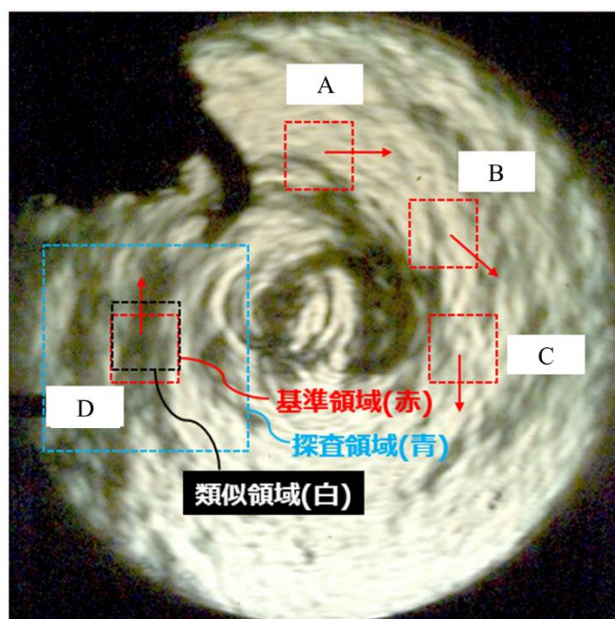


Fig.2.11 Setting each area for measuring gas flow velocity

続いて、実験条件の一覧を表 2.2 に示す。まずは放電の基礎特性評価として流速 12 m/s, 空気雰囲気での条件を実験 No.1 として設定し、基準条件として扱う。基準条件において、放電画像と電圧波形との関係性について比較考察し、本章の焦点の一つである放電エネルギーを電圧および電流波形から算出する。

実験 No.2 では流速を変化させた実験を実施し、実験 No.3 では理論空燃比および燃料希薄条件での実験を実施する。最後に実験 No.4 で CO<sub>2</sub> を付与した実験を行う。CO<sub>2</sub> の充填量は 28%とし、空気比は 1.0 とすることで、混合気全体に対する燃料の充填量を実験 No.3 の燃料希薄条件と合わせることができ、それらの比較評価が可能となる。実験 No.3 および実験 No.4 は燃焼時の特性として併せてまとめる。

Table.2.2 Experimental conditions

Examination No.	Velocity [m/s]	Gas type (Excess air ratio $\lambda$ [ - ])	CO <sub>2</sub> [%]
1	12	Air	0
2	7, 12, 22	Air	0
3	12	Mixture (1.0, 1.4)	0
4	12	Mixture (1.0)	28

## 2.3 実験結果および考察

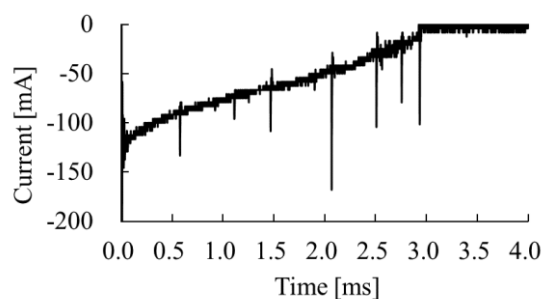
### 2.3.1 基礎特性評価

表 2.2 に記載の実験 No.1 で取得した結果について、図 2.12 に (a) 電流波形、(b) 電圧波形、(c) 放電距離として記載する。いずれも横軸には初回放電開始からの経過時間としている。放電が伸長する様子を捉えた撮影画像を図 2.13 に示すが、放電距離に関しては放電柱の半径方向中心を通過する距離として結果を整理する。放電経路が複数確認された画像は 2 つのデータとして扱っている。また、電圧が急峻に低下した際の放電画像を図 2.14 の A～F に抽出しており、図 2.12 (b) に記載の記号と対応させている。

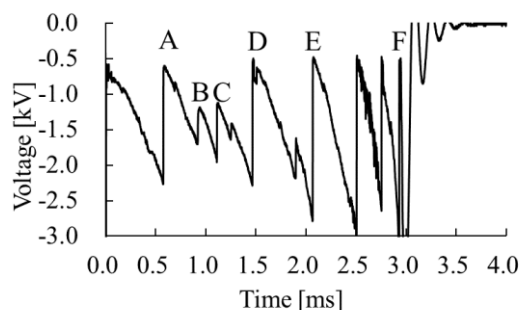
本実験における初回放電直後の電流値は約 120 mA であり、放電時間は約 3.0 ms であった。また、電圧波形に関しては既存研究<sup>(18)</sup>と同様、のこぎり状の波形が確認できる。のこぎり状の電圧波形および放電距離には相関があり、放電経路が長いほど高い電圧を示していることが分かる。ただし、放電後期になるほど放電距離に対して高い電圧を示し、同時に、のこぎり状の波形における周期の短縮も確認できる。本結果で確認された挙動は電流値が影響しているものと推測され、約 50 mA がしきい値であった。

図 2.14 において、いずれの画像でも放電経路が複数確認されており、露光時間に相当する 0.1 ms の間に再放電が生じていることが分かる。図中 A,D,E,F では電極間で再放電しており、降下後の電圧は初回放電直後、すなわち放電伸長していない時の電圧と一致し約 0.6 kV となっている。一方、図中 B,C では放電経路途中で新たな放電経路が形成されており、

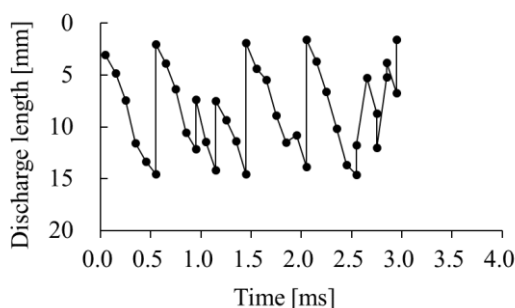
降下後の電圧はA,D,E,Fと比べ高い電圧を示している. 特にBの撮影画像で顕著であるが, もともと存在していた放電経路は比較的きれいな円弧を形成しており放電経路の途中で接触しているようには見えない. したがって, 本画像より, 短絡現象ではなく放電経路途中での再放電と判断することが妥当と考える. 再放電電圧が十分に低いことと, また, 放電伸長による放電経路間の電界強度の増大を踏まえると十分に生じ得る現象であると考え. 上記の結果から, 再放電には電極間および放電経路間の 2 種類が存在し, 降下後の電圧は再放電経路の長さに相関することが示唆された. また, 放電現象のみをとっていても高流動下での再現性は低く, 放電路の長さおよび再放電により初期火炎核の形成過程が大きく変わることが読み取れる.



(a) Current waveform



(b) Voltage waveform



(c) Discharge length

Fig.2.12 Discharge current, voltage and length

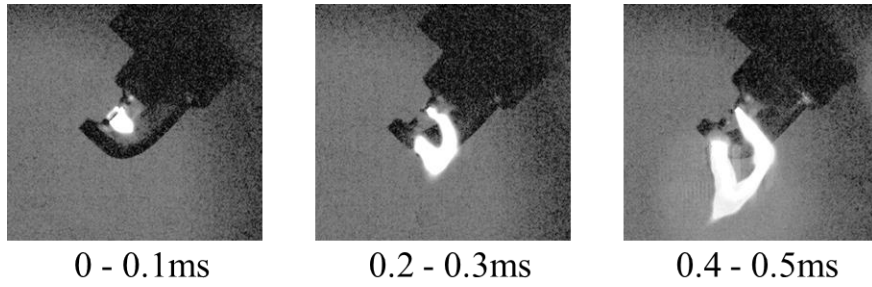


Fig.2.13 Discharge channel image

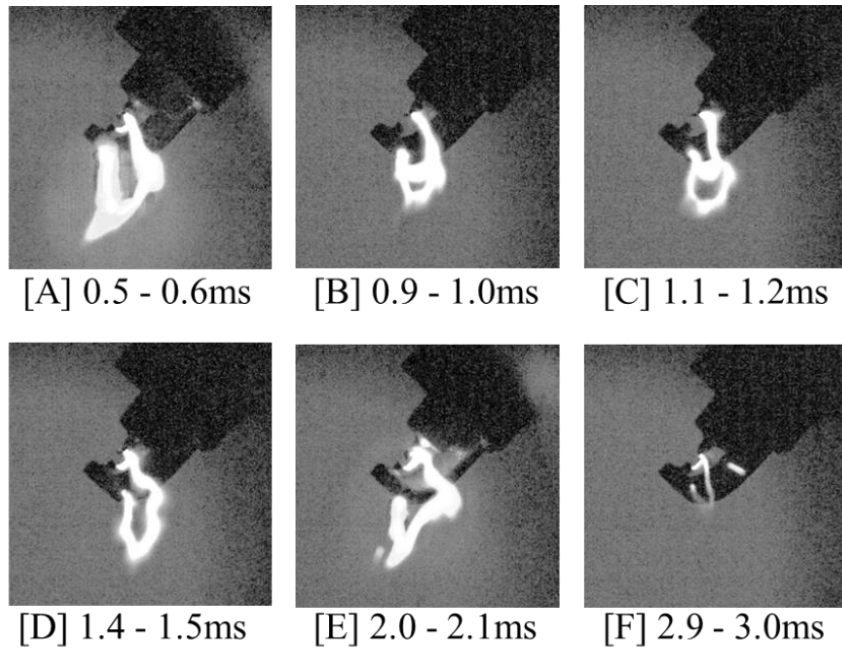


Fig.2.14 Snap shot of discharge channel from first strike

続いて、電圧および電流波形から抵抗値を算出した結果を図 2.15 に示す。ここでは、プラグの内部抵抗および放電抵抗の 2 つが直列で接続されていると仮定し算出している。合成抵抗は電圧波形と同様にのこぎり状となり、電圧が高いときほど高い抵抗値を示す。合成抵抗からプラグ抵抗 4.2 kΩ を差し引いた値が放電抵抗に該当するため、放電伸長していない時は数 kΩ 以下であり、放電伸長するに伴い 10 倍以上に増大する傾向が読み取れる。さらに、放電後期になるほど放電伸長時の抵抗が増大する傾向も確認される。

図 2.16 は電流および抵抗値から算出した消費エネルギーを示している。図 2.15 と同様、合成抵抗およびプラグ抵抗による消費エネルギーをそれぞれ表しているため、両者の差分が放電抵抗による消費エネルギーとなる。総発熱量は電流値の 2 乗に比例し、式(3)で表すことができる。

$$W = (R_p + R_d)I^2 \quad (3)$$

ここで $W$ は総発熱量 $R_p$ はプラグ抵抗 $R_d$ は放電抵抗 $I$ は電流を示している。総発熱量はのこぎり状の波形を示しつつ全体として徐々に減衰していく。ここで、プラグ抵抗による消費エネルギーをプラグ損失、放電抵抗による消費エネルギーを放電エネルギーと定義する。本実験条件においては、放電エネルギーは、伸長していない時で20 W程度、伸長時には最大で150 W程度が確認された。一方、プラグ損失は最大で60 Wであった。

以上の結果から、放電が伸張するほど放電抵抗が増大し、それに伴い放電エネルギーが増大する傾向にあると言える。投入されたエネルギーは、プラグ抵抗および放電抵抗の比によって両者に分配されるため、放電が伸張するほど効率よく混合気にエネルギーを投入できることとなる。また、放電後期では放電抵抗が増大するため、エネルギー効率の観点では有利であるが、低電流かつ放電が伸張していないため着火への寄与は比較的小さいものと推測される。

以上の基礎特性を把握した上で、流速および燃焼条件が変化した際の放電エネルギーについて評価した結果を述べる。

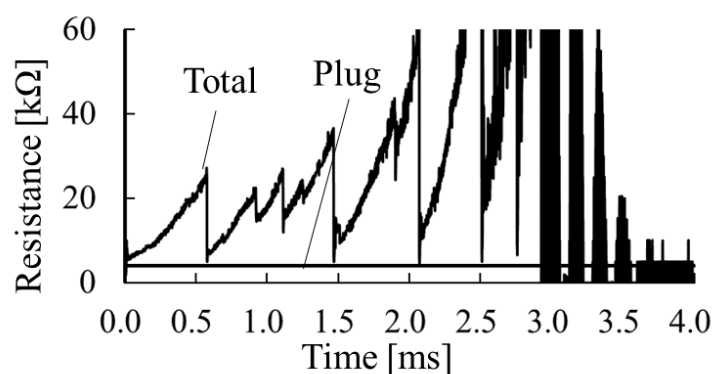


Fig.2.15 Change of resistance under swirl flow

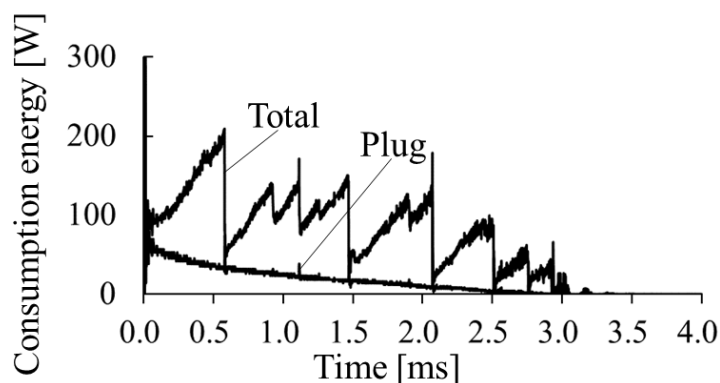


Fig.2.16 Change of consumption energy under swirl flow



### 2.3.2 流速依存性

流速を変化させた実験 No.2 の条件において、放電エネルギーの推移および総量を示す図 2.17 に示す。いずれの実験結果も約 250 mJ がプラグに投入されているが、放電抵抗によりプラグ損失が変化するため、同様に放電エネルギーも変化する。なお、流速 12 m/s の結果が図 2.15 および図 2.16 で示した実験 No.1 の結果に該当する。

放電エネルギーと電圧の間には相関があるため、放電伸長および再放電の挙動は放電エネルギーからでも議論が可能である。図 2.17 の結果において、いずれの流速でも放電が伸長するにつれて放電エネルギーが上昇していき、再放電が生じると放電エネルギーは急峻に減少する傾向が確認できる。また、流速が高いほど放電が速く伸長し、結果、繰り返し発生する再放電の周期が短くなっていることが分かる。流速が高いほど全体の放電時間がやや短くなる傾向にあるが、それ以上に再放電の周期が短縮されるため、流速が高い方がより放電回数が増える傾向にある。したがって、火花放電においては再放電の周期および回数が流速に依存することが分かる。内燃機関においては、運転条件が同じでも流速のばらつきは起きるため、放電の挙動が流速に強く依存することは着火の確実性を損なう要因となる。

混合気に放電エネルギーが与えられることで初期火炎核が形成されるが、再放電が発生した際には火炎核が流動によって分断される。放電経路間で再放電した場合には分断された火炎核が成長して融合する可能性はあるものの、基本的には、一度の放電によりどの程度のエネルギーが混合気に与えられるかが重要である。放電エネルギーの全てが放電抵抗によるジュール熱として消費されると仮定すると、例えば、流速 22 m/s の結果における初回の放電では 33 mJ (0 - 0.39 ms)と試算できる。続く二回目の放電では 37 mJ (0.39 - 0.72 ms)、三回目の放電では 25 mJ (0.72 - 1.02 ms)である。以上のように結果を整理すると、電流波形は単調減少であるが、混合気に最も大きな放電エネルギーが混合気に与えられるのは必ずしも初回の放電とは限らないことが分かる。放電エネルギーが初期火炎核の大きさに影響を与えると考えると、断続的に形成される初期火炎核は必ずしも再放電を繰り返すたびに小さくなっていくわけではないと言える。

流速 12 m/s の結果も同様に試算すると、初回の放電では 50 mJ (0 - 5.8 ms)である。流速 22 m/s の結果と比べて放電エネルギーのピーク値はより低いものの、再放電するまでの時間が長い傾向にあるため、一度の放電でより大きなエネルギーが混合気に与えられる。また、二回目以降の放電では放電経路間の再放電が二度続くが、それぞれ試算すると、21 mJ (5.8 - 9.2 ms), 17 mJ (9.2 - 11.1 ms), 32 mJ (11.1 - 14.7 ms)である。二回目から四回目までの放電はいずれも初回の放電よりも放電エネルギーが小さいことが分かる。しかしながら、各放電により生成された初期火炎核が融合する場合には、与えられたエネルギーは合計 70 mJ とみなすことができ、初回の放電エネルギーを上回る。再放電前に生成された初期火炎核と放電経路間の再放電により生成された初期火炎核は距離が近いいため融合しやすく、反対に、電極間の再放電は距離が離れるために分断されやすいと考えられる。よって、1つの初期火炎核を生成するための放電エネルギーは再放電の経路に依存することが示唆される。

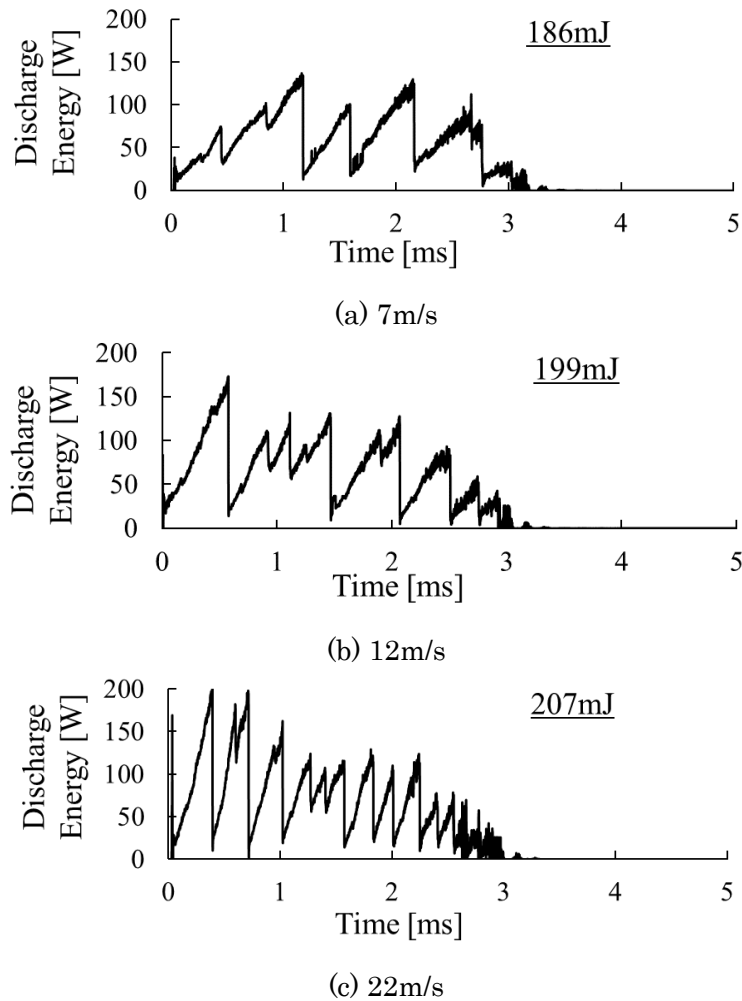


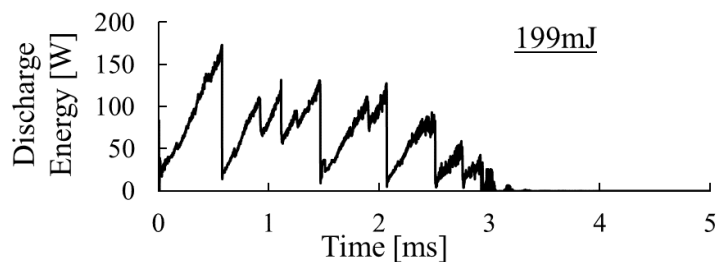
Fig.2.17 Dependence of flow velocity on discharge energy

### 2.3.3 燃焼条件の影響

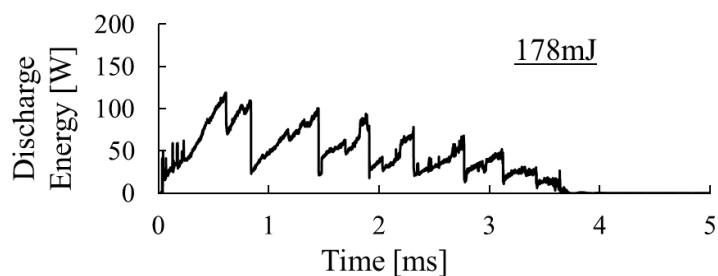
本項では燃焼条件の影響を調べた結果を示す。燃焼条件によって放電抵抗が変化することが予想されるため、空燃比や希釈する気体によって混合気に与えられる放電エネルギーが変化することを本実験で確認する。図 2.18 に燃焼条件を変化させたときの放電エネルギーの推移および総量を示す。実験 No.2 の空気雰囲気を図 2.18(a)とし、空気比 1.4 および 1.0 をそれぞれ (b) および (c) , CO<sub>2</sub>を充填した条件を(d)としている。流速はいずれも 12 m/s である。CO<sub>2</sub>を充填していない条件では (a), (b), (c) の順で放電エネルギーのピーク値および総量が低下する傾向が確認でき、放電が維持される時間においても同様の順序で長くなることが分かる。点火コイルに蓄えられたエネルギーは放電抵抗が小さいほど長い時間をかけて消費されるため、空気比が小さいほど放電抵抗が低くなる傾向が読み取れる。また、単位時間当たりの放電エネルギーの上昇においても同様の順序であり、流速が同じでも混合気が燃料希薄になるほど、放電が伸長する速度が高いことが分かる。したがって、放電エネルギーのピーク値および総量、放電抵抗ならびに放電が伸長する速度にはそれぞれ相関があること

が示唆される。

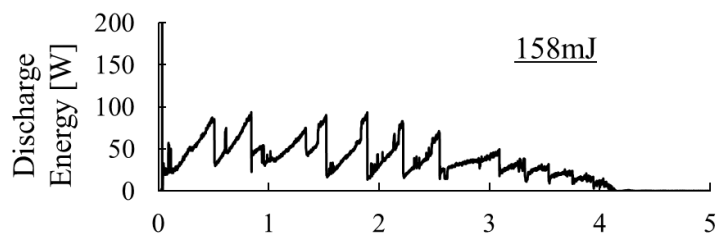
一方, (b) および (d) においては, 燃料割合が同じであるが, 希釈する気体が空気および  $\text{CO}_2$  で異なる条件である. 両者を比較すると  $\text{CO}_2$  で希釈した (d) の方が空気雰囲気での (a) の結果により近いことが読み取れる. 空気よりも  $\text{CO}_2$  で燃料を希釈した方が低い燃焼温度となることを踏まえると, 放電の挙動に関しては, 燃料割合ではなく放電経路における気体の温度に影響されることが示唆された.



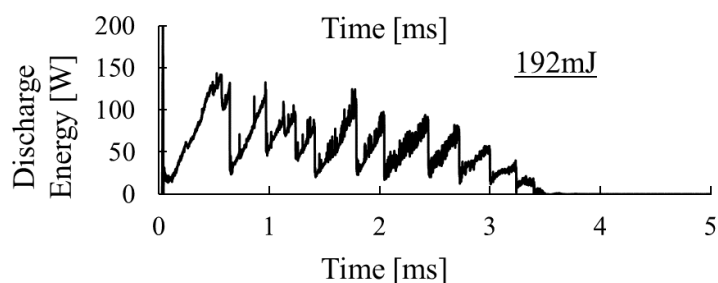
(a) air



(b)  $\lambda = 1.4$



(c)  $\lambda = 1.0$



(d)  $\lambda = 1.0$  ( $\text{CO}_2$  : 28%)

Fig.2.18 Dependence of combustion conditions on discharge energy

## 2.4 高流動に効果的な点火方法の考察

2.3 節にて流速および燃焼条件を変化させた際の再放電の挙動と混合気とに与えられる放電エネルギーの関係性について述べた。流速が高いほど再放電が発生する周期が短くなり、再放電の経路によって 1 つの初期火炎核に与えられる放電エネルギーが変化することが明らかになった。また、燃焼条件を変化させた場合においても、空燃比だけでなく希釈する気体の種類によっても混合気へ与えられる放電エネルギーが変化することが判明した。

高流動下においても確実に着火するためには初期火炎核の形成過程が非常に重要であるが、初期火炎核を形成する放電路および放電エネルギーは流速や燃焼条件の影響を受ける。よって放電雰囲気の影響を受けることなく、一定の周期および一定の放電エネルギーで繰り返し放電が可能な着火方法が高流動下での確実な着火に有効であると考えられる。高流動下における火花放電および繰り返し放電による着火の概略図を図 2.19 に示す。火花放電では再放電ごとに周期や放電エネルギーが変化するために初期火炎核群は不規則に下流方向へ流れる。一方で繰り返し放電では形成された初期火炎核群が規則的に下流方向へ流れるため放電雰囲気によらず安定した形状の初期火炎核を形成できるものと考えられる。

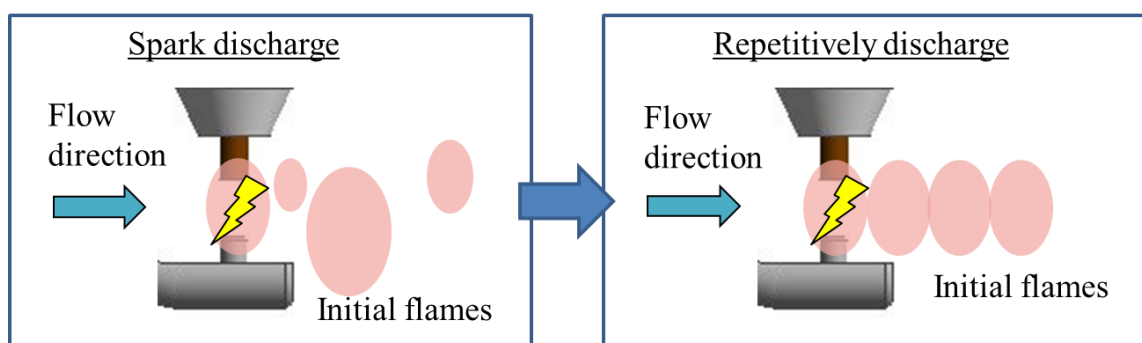


Fig.2.19 Ignition under strong flow by spark discharge and repetitively discharge

## 2.5 結論

再放電を繰り返す火花放電の挙動と混合気とに与えられる放電エネルギーの関係性を調査するため、流速および燃焼状態を変化させて高流動下での放電の挙動を評価した。結果、下記の知見を得た。

- (1) 再放電する経路には電極間および放電経路間の 2 種類が存在することが確認された。
- (2) 一度の火花放電において、再放電が発生する周期および回数は流速に依存することが確認された。
- (3) 再放電により繰り返し発生する火花放電を個々に評価すると、混合気とに最も大きな放電エネルギーを与えるのは必ずしも初回の放電とは限らず、再放電の経路に依存することが示された。

- (4) 燃焼時には放電が伸長する速度が低下するが、その傾向は燃料割合ではなく、放電路における気体の温度の影響を受けることが示唆された。
- (5) 高流動下において確実に着火するためには、放電雰囲気の影響を受けず一定の周期かつ一定の放電エネルギーを繰り返し投入できる点火方法が望ましいと考えられる。

## 第3章 多段パルス放電の着火性評価

### 3.1 序論

希薄燃焼の実現に向けて燃焼室内の高流動化が提案されているが、高流動下の火花放電は複雑な挙動となり着火の確実性を低下させる。2章では高流動下における火花放電の挙動と混合気と与えられる放電エネルギーの関係性を明らかにし、高流動下においては一定の周期かつ一定の放電エネルギーを繰り返し投入できる点火方法が効果的であると結論付けた。本章では上記点火方法の有効性を検証し、初期火炎核の形成過程を明らかにすることを目的とする。

一定の周期かつ一定の放電エネルギーを繰り返し投入できる点火方法として多段パルス放電 (Multi-Stage Pulse Discharge : MSPD) が発生可能な装置を製作し、スワール流を発生可能な単気筒エンジンにより着火性を評価する。具体的には、スワール流を発生させない条件および発生させた条件のそれぞれにおける希薄燃焼時において市販車用点火コイルを用いた火花放電点火 (Spark Ignition : SI) と MSPD の着火性の比較を行う。さらに、得られた可視画像を用いて放電の挙動と初期火炎核について観察し考察を行う。

### 3.2 実験装置および方法

#### 3.2.1 単気筒可視化エンジン

供試機関の諸元を表 3.1 に、実験装置概略図を図 3.1 にそれぞれ示す。供試機関には、2ストローク空冷単気筒エンジンを用いた。本機関はシリンダヘッド上部に石英観測窓を設けており、ハイスピードカメラにて全ボア領域の直接撮影が可能である。図 3.1 の平面図に示すように、燃焼室のボア方向から市販の点火プラグを挿入し、当該電極間に多段パルス放電および、市販の点火コイルを用いた通常の火花放電を行った。点火プラグは、流動の影響を受けやすいように接地電極を下向きに設置した。また、流動は2つある掃気ポートの内、一方を塞ぐことでスワール流を発生させた。供試燃料には、自動車用ガソリン (JIS 1 号) を用いた。燃焼室側部に設置した水晶圧力変換器を用いて筒内圧力  $P$  [MPa] を測定した。また、掃気ポート付近に設置した K 型シーチ管熱電対により掃気温度  $T_{sc}$  [K] を測定した。

本章では、スワール流の有無および放電条件が初期火炎の形成に与える影響を調査するため、点火プラグ近傍での高速度撮影を行った。撮影速度は 10,000 fps (frames/sec.)、解像度は 512×512 pixels とした。

Table.3.1 Specifications of test engine

2-stroke Air-cooled Single Cylinder Gasoline Engine	
Type of Scavenging System	Schnürle
Bore × Stroke	72 × 60 mm
Displacement	244 cm <sup>3</sup>
Exhaust Port Closing Timing	- 106 deg. ATDC
Effective Compression Ratio	8.5
Test Fuel	Gasoline (JIS # 1)
Frame Rate	10000 fps
Frame Resolution	512 × 512 pixels

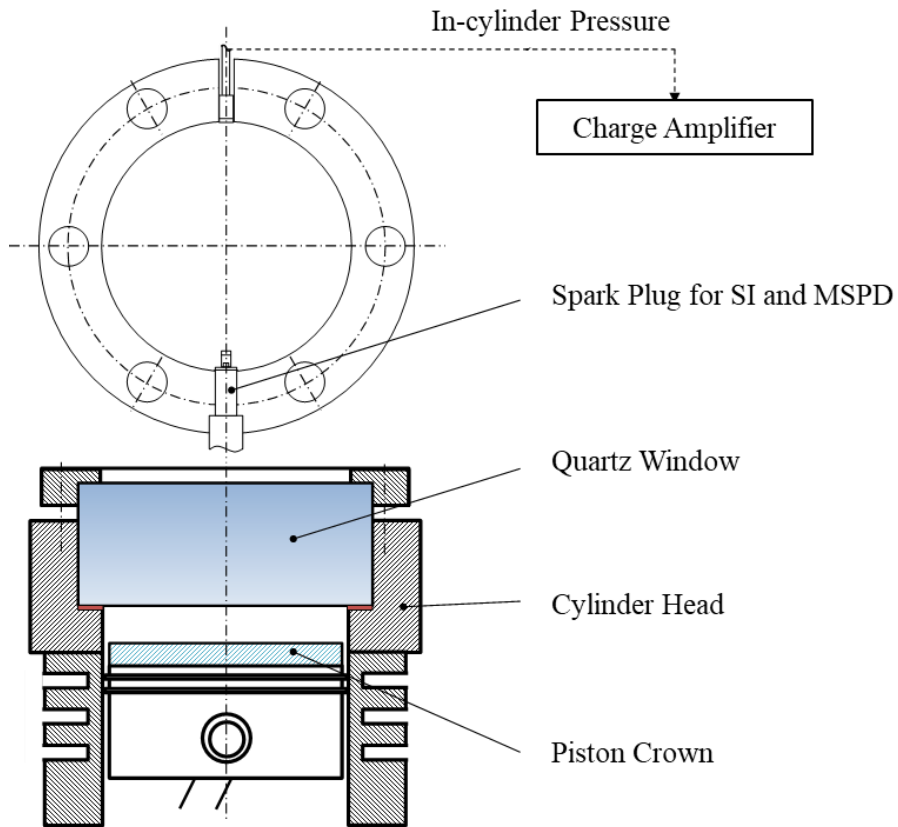


Fig.3.1 Configuration of optically accessible engine

### 3.2.2 多段パルス放電

本章で用いた放電回路の概要を図 3.2 に示す. フライバック方式の昇圧回路を用い, 入力側にパルス信号を与えることで, 高電圧のパルスを形成し, 点火プラグに印加した. 従来の点火装置と同様に 1 次電流を遮断することで昇圧トランスの 2 次側に高電圧を発生させる方法であるが, スwitching素子を MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) とし, 昇圧トランスのコア材にナノ結晶軟磁性材料 (日立金属社製 FINEMET) を使用し巻き数比を調整することで, 短いパルス幅の電圧を出力できるようにしている.

1 次側への入力パルスのイメージ図(放電間隔 2 kHz の場合) を図 3.3 に示す. 本章では, 点火トリガーを検出後, 電圧 80 V, パルス幅 8  $\mu$ s のパルス 6 回形成し, 2 次側に高電圧パルス放電を発生させた. 図 3.4 に 2 kHz で出力した際に得られた電圧および電流波形を示す. 本結果からパルス幅は約 6  $\mu$ s であることを確認した. 非平衡プラズマを生成できるほどの短いパルス幅ではないが, 通常の火花放電に比べて 1/100 以下のパルス幅であり MSPD において放電中は流動の影響は無視できるものと考ええる.

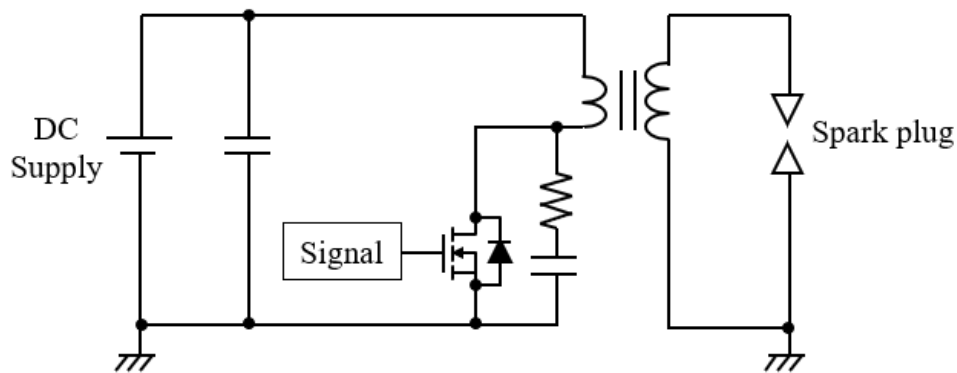


Fig.3.2 Circuit diagram for multi-stage pulse discharge

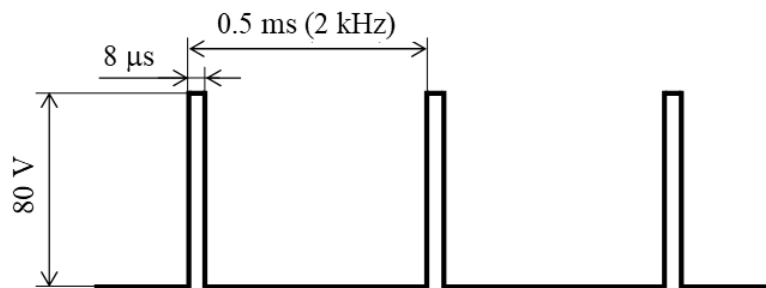


Fig.3.3 Schematic diagram of pulse signals in primary side



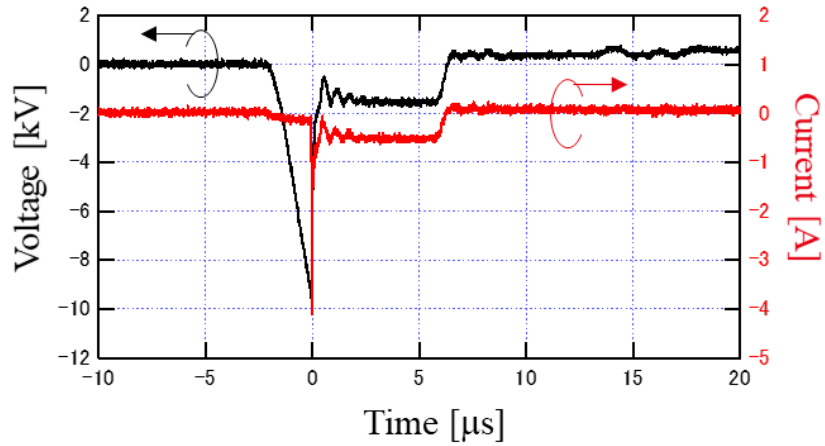


Fig.3.4 Output voltage and current waveform with MSPD circuit

### 3.2.3 実験条件

実験条件を表 3.2 に示す. Case 1 ではスワール流を発生させず, Case 2 では掃気ポートを塞ぐことでスワール流を発生させた. 原理図を図 3.5 に示す. それぞれの条件において SI と MSPD の着火性の比較を行った. SI の点火エネルギーが 30~40 mJ, MSPD の 1 回の点火エネルギーが 5~6 mJ であり, 総放電エネルギーを同程度とするため, 放電回数は 6 回に設定した. MSPD は放電周波数を 2, 10, 20 kHz と変化させ, 放電周波数の変化による着火性の比較を行った. 本実験では各条件の最適点火時期ではなく点火時期を統一した場合の着火性を比較する. 最適点火時期については付録 C に記載する.

Table.3.2 Experimental condition

	Case 1	Case 2
	Without Swirl	With Swirl
Engine Speed, N	1200 rpm	
Equivalence Ratio, $\phi$	0.55	
Scavenging Temperature, T <sub>sc</sub>	303 K	
Ignition	SI, MSPD	
Number of Discharges	1 (SI), 6 (MSPD)	
Pulse Frequency, $f$ (only MSPD)	2 kHz (3.60 deg. / pulse)	
	10 kHz (0.72 deg. / pulse)	
	20 kHz (0.36 deg. / pulse)	
Ignition Timing, I.T.	- 15 deg. ATDC	

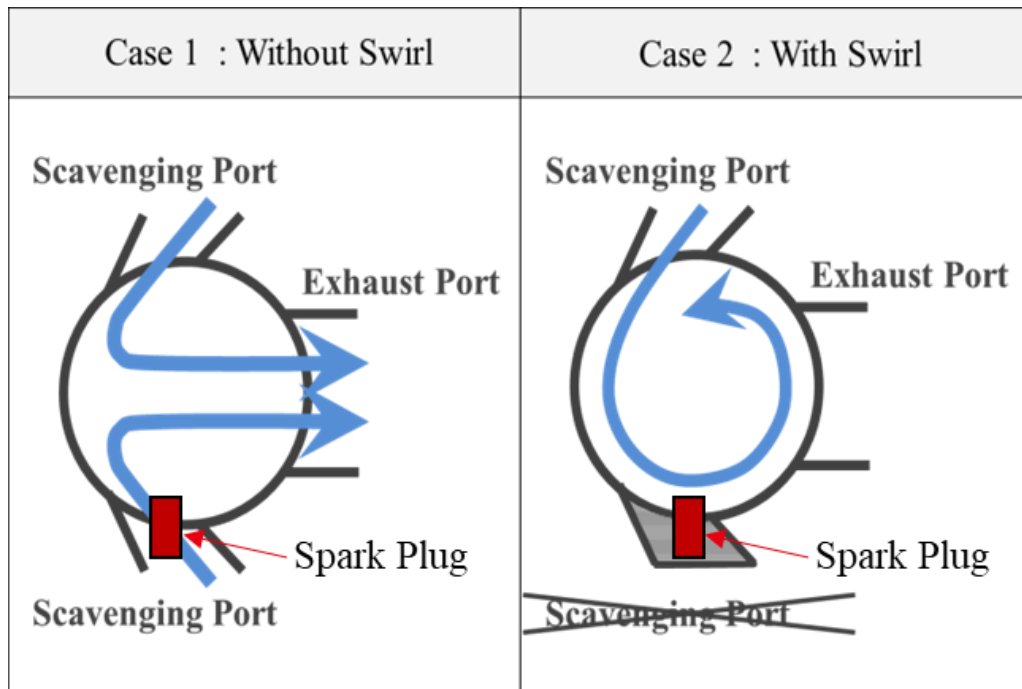


Fig.3.5 Swirl direction in the combustion area

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 多段パルス放電と SI の燃焼特性比較

表 2.2 に示した各条件にて得られた連続 40 サイクルにおいて、横軸をクランク角、縦軸を圧力とした筒内圧波形を図 3.6 にまとめる。ピストン運動による圧力変化に加わって点火時期である  $-15 \text{ deg}$  以降は燃焼により圧力が上昇し、燃焼が速く進むほど圧力は早期に上昇し最大圧力も高くなる。サイクルごとに燃焼が進む速さが変動するため、筒内圧波形および図示平均有効圧も同様にサイクルごとに変動する。また、本節の考察では初期火炎核の成長速度が大きく影響すると予想される熱発生 5% 時期 (CA 5 [deg. ATDC]) を用いる。CA 5 について説明するため、図 3.7 に筒内圧波形および熱発生速度の概略図を示す。熱発生速度を積分することで全熱発生量を求め、全熱発生量に対して 5% の熱発生が生じるときのクランク角が CA 5 である。

スワール流の有無および放電条件が燃焼変動に与える影響を詳細に調査するために、図 3.6 に示した筒内圧波形から得られた図示平均有効圧 (IMEP) の変動率 ( $\text{COV}_{\text{IMEP}}$ ) を図 3.8 に示す。また、スワール流の有無および放電条件が燃焼の初期段階に与える影響を調査するために、図 3.9 に CA 5 と各放電条件の関係を示す。

まず、スワール流の有無が燃焼変動および CA 5 に与える影響に着目して考察を行う。図 3.8 より、Case 1 に比べ、Case 2 のスワール流を発生させた場合では MSPD (20 kHz) 以外の

放電条件において  $COV_{IMEP}$  が低減していることが分かる。MSPD においては、10 kHz が最も  $COV_{IMEP}$  が低い結果となった。MSPD により断続的に生成される火炎が連なることを想定すると、MSPD(2 kHz)では火炎が連ならないことがあり、反対に 20 kHz では放電周期が短く単一の火炎しかできていない可能性が考えられる。よって、スワール流の流速に対して適切な周波数が存在することが示唆される。MSPD(20 kHz)の  $COV_{IMEP}$  が顕著に悪化したことから、本実験条件においては 2~10 kHz の間に最も  $COV_{IMEP}$  が低下する周波数があると考えられる。実験装置の都合上、本実験では流速を計測できていないが、流速と周波数の関係を明らかにすることは今後の課題である。

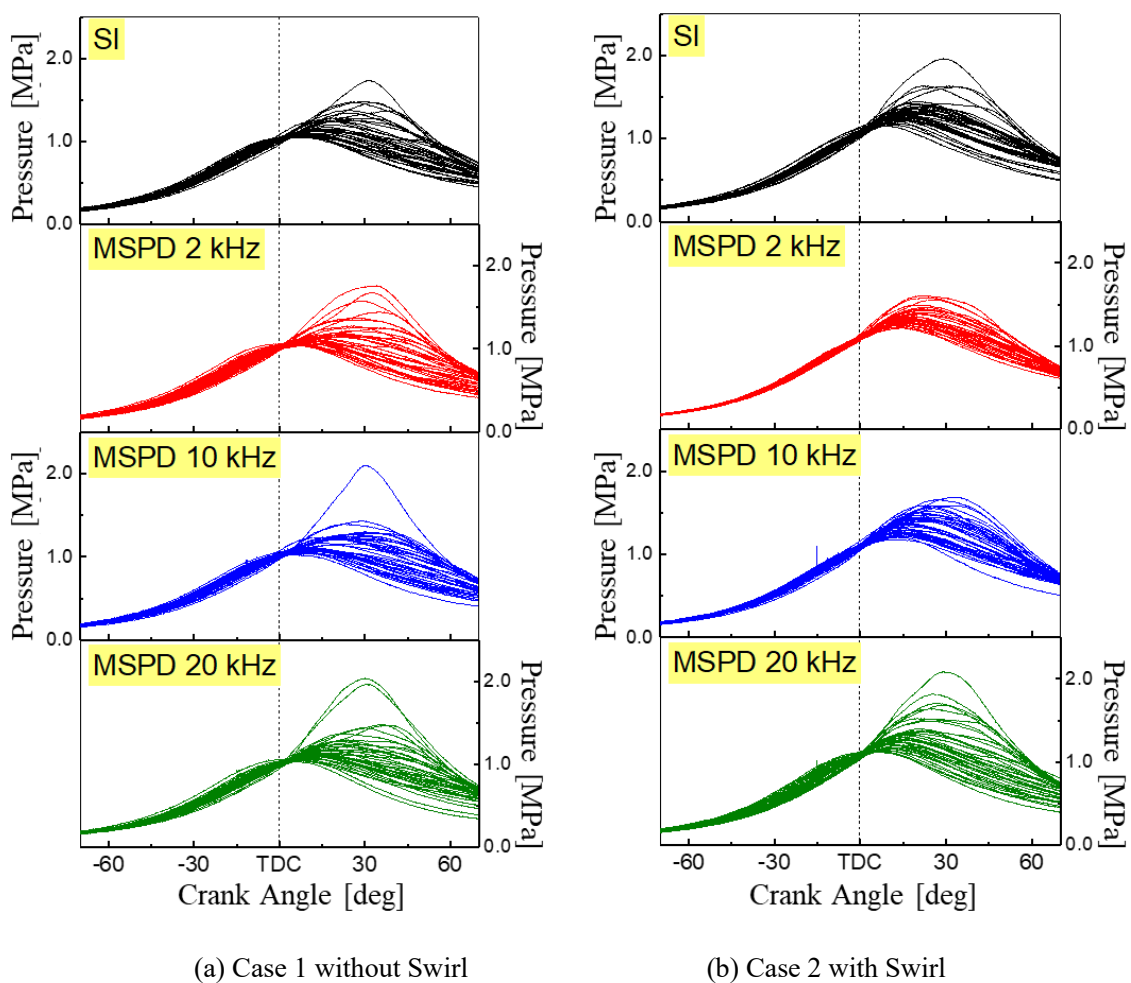


Fig.3.6 Difference of in-cylinder pressure between case 1 and case 2

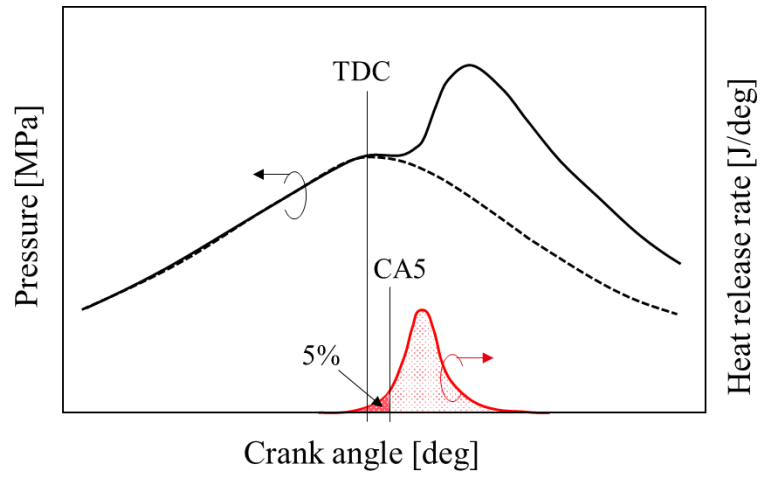


Fig.3.7 Pressure and heat release rate for calculating CA 5

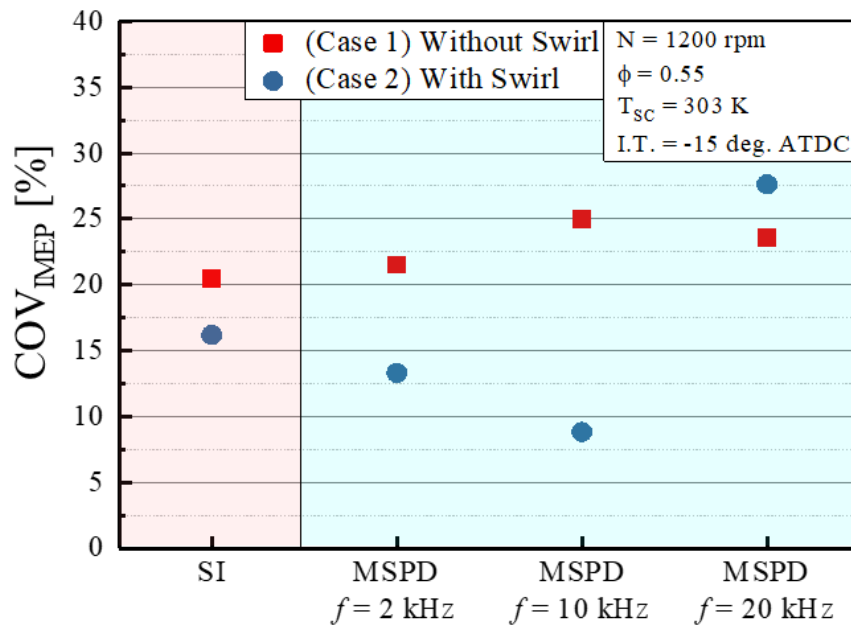


Fig.3.8 Influence of ignition conditions on COV in IMEP

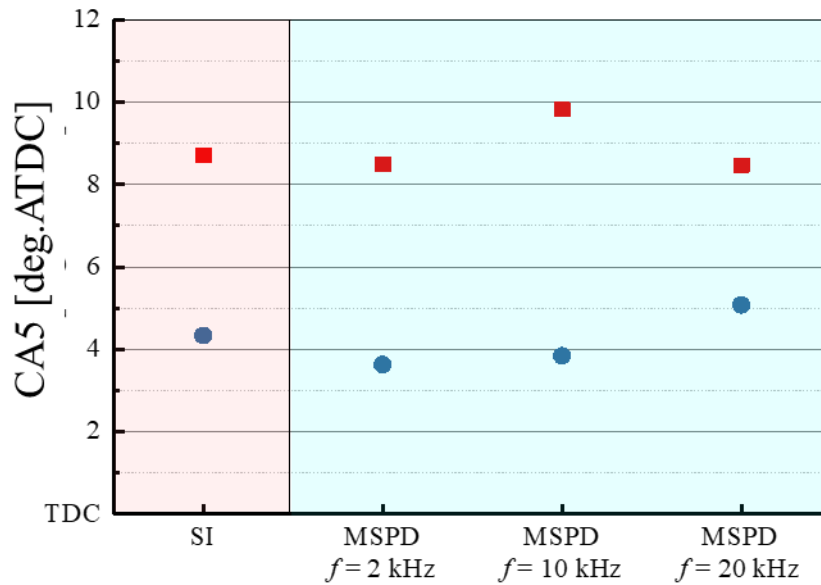


Fig.3.9 Influence of ignition conditions on CA5

以上より，SI，MSPD(2 kHz)およびMSPD(10 kHz)において，スワール流を発生させることで燃焼が安定することが確認できた。CA5を示した図3.9においてスワール流の有無に着目すると，すべての放電条件においてスワール流を発生させないCase 1に対し，スワール流を発生させたCase 2の場合ではCA5が進角し，初期火炎の成長が促進されていることが分かる。スワール流の発生によって初期火炎の成長速度が増加することで，前述した $COV_{IMEP}$ が低減したものと推測できる。

次に，放電条件の変化が燃焼変動およびCA5に与える影響に着目して考察を行う。図3.8より，Case 1のスワール流を発生させない場合には，放電条件の変化による $COV_{IMEP}$ の変化は少なく，SIがMSPDに比べわずかに安定していることが分かる。対して，Case 2のスワール流を発生させた場合には，MSPD(2 kHz)，MSPD(10 kHz)においてSIに比べ大幅に $COV_{IMEP}$ が低くなっていることが分かる。ここで図3.8の放電条件の変化に着目すると，Case 2においてSIに比べてMSPD(2 kHz)，MSPD(10 kHz)がCA5に早く到達し，初期火炎の成長速度が増加していることが分かる。初期火炎核の成長速度が増加したことが図3.8に示した $COV_{IMEP}$ を低減した要因であると推測する。

以上より，Case 2のようなスワール流を発生させた条件でMSPDを用いることでより高い着火性改善の効果が得られ，SIと比較して安定した燃焼を実現できると考えられる。

### 3.3.2 点火プラグ近傍における初期火炎核形成の可視化観察

スワール流の有無および放電条件の違いが前節で述べた初期火炎の成長速度の変化にどのように影響を及ぼすか調査するために、点火プラグ近傍の可視化画像を用いて比較を行う。図 3.10 に SI における点火時期 (Ignition Timing; I.T.) = -15 deg. ATDC から -0.12 deg. まで 2.16 deg. ごとに配置した可視化画像を示す。また、図 3.11 に MSPD (2 kHz) における 5 回の放電の瞬間と前後 0.72 deg. の画像 (1 回目は放電後 0.72 deg. のみ) を示す。

図 3.10 より Case 1 において絶縁破壊後から放電終了の約 -2 deg. ATDC まで点火プラグのギャップ間にて強い発光を伴った放電の様子が確認された (領域 A)。火炎核はギャップ間で形成されたと考えられ、接地電極を覆うように火炎が成長していることが分かる。よって、火炎から接地電極への冷却損失により火炎の成長が妨げられていると予想できる。対して、スワール流を発生させた Case 2 では絶縁破壊後、-4.20 deg. まで放電が伸張する様子が確認できる (領域 B)。Case 2 における放電を観察するために、画像の輝度を下げ  $128 \times 128$  pixels にトリミング処理を行った可視化画像を図 3.12 に示す。Case 2 における SI の放電は図 3.12 のように大きく伸張した放電部が再放電する様子が繰り返し確認された。スワール流によって放電の伸張および再放電が繰り返されることで点火コイルに蓄えられたエネルギーがより速く消費され放電時間が 2 deg. 程減少したものと考えられる。放電時間が減少したにもかかわらず、前節で述べたように Case 2 で  $COV_{IMEP}$  が減少、CA5 が進角した要因は放電伸張により接地電極から離れた箇所では火炎核が形成されたことだと考えられる。

図 3.11 より、Case 1 において MSPD 1 回の放電エネルギーによって火炎核が形成されている様子が確認できた。また、その後も火炎核がギャップ間に留まっており、さらに 2 回目、3 回目の放電が行われたことで形成された火炎核もギャップ間に留まっていることが分かる (領域 C)。そのため、既燃ガス中に放電しており 2 回目以降の放電の効果を十分に得られていないと考えられる。また、Case 1 の SI と同様に接地電極を覆うように火炎が成長している。以上のような要因が、接地電極への冷却損失を大きくし、スワール流を発生させていない Case 1 で  $COV_{IMEP}$  が悪化した原因だと考えられる。

続いて、Case 2 は Case 1 と同様に 1 回目の放電で火炎核が形成されたことが確認できる (領域 D1)。その際、MSPD は 1 回あたりの放電期間が短いため、SI のように流動によって放電が伸張した様子は見られなかった。しかしながら、流動によって火炎核が紙面右方向に流され、火炎の無い未燃混合気に次の放電が行われていることが 2 回目の放電前後の可視化画像より分かる (領域 D2)。よって、2 回目以降の放電も火炎形成に寄与していると推測でき、また、放電によって複数形成された火炎核が連なることで、やがて大きな火炎を形成していることが分かる。

以上より、SI、MSPD 両条件において流動が初期火炎の成長を促すことが確認できた。さらに、SI と MSPD では初期火炎の形成過程は明確に異なり、SI は放電伸張によって接地電極から離れた箇所で比較的長い期間混合気にエネルギーを与えることで大きな火炎核を形成するのに対し、MSPD は押し流された火炎核の上流で新たな火炎核を形成し、それらが連な

ることで大きな火炎を形成していることが分かった。

また、本章ではスワール流を発生させた条件において MSPD (2 kHz) および MSPD (10 kHz) が燃焼変動の低減に効果的であった。しかしながら、回転数の変化に伴う流動の変化や、当量比などによってMSPDの周波数や点火回数の最適値が変化することが考えられる。

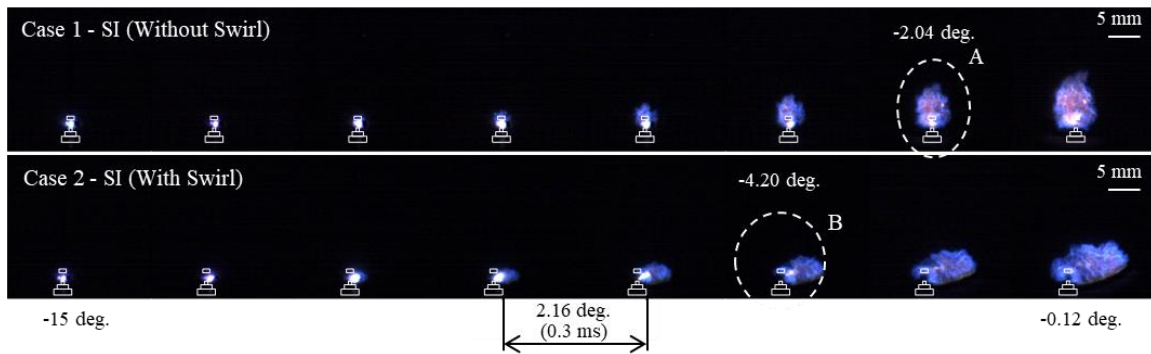


Fig.3.10 Visualized images of ignition process on SI

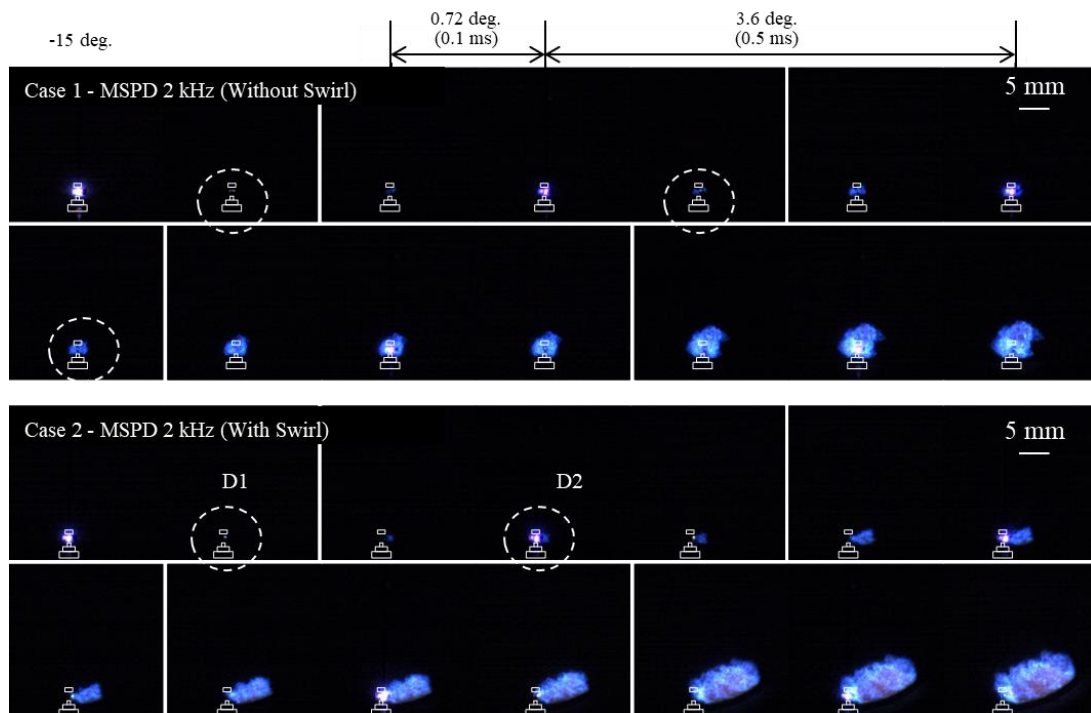


Fig.3.11 Visualized images of ignition process on MSPD (2 kHz)

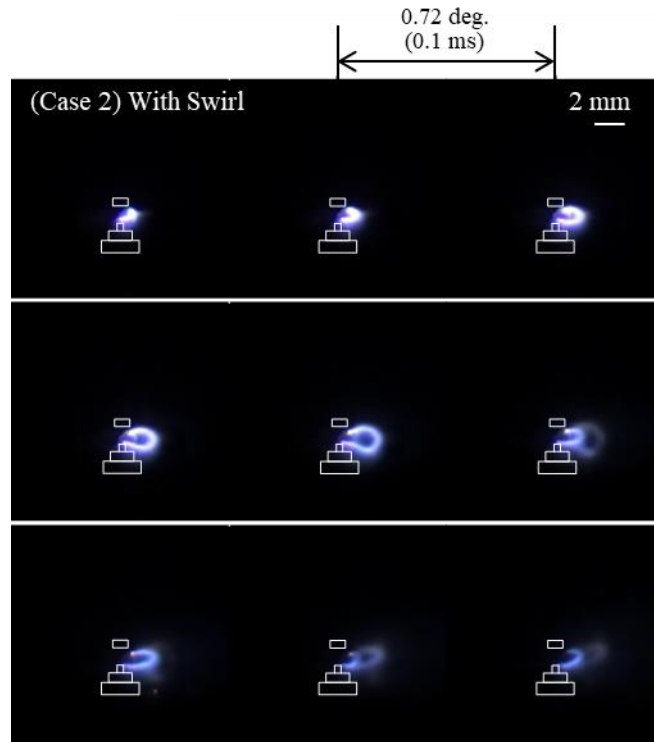


Fig.3.12 Visualized images of the stretching discharge

### 3.4 結論

本章では、流動環境下における多段パルス放電（MSPD）の効果を確認するために、単気筒可視エンジンを用いて火花放電点火（SI）と着火性を比較した。また、得られた可視画像をもとに初期火炎核の形成過程を考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 筒内に発生させたスワール流は SI および MSPD の着火性を向上させ、図示平均有効圧の変動率を低減させることを確認した。
- (2) スワール流を発生させた条件で MSPD を用いることで燃焼変動の低減効果がより大きくなり、SI と比べ安定した燃焼となった。
- (3) スワール流を発生させていない条件では、SI、MSPD 共に火炎をギャップ間で形成していたため、火炎の成長が妨げられていることが判明した。
- (4) SI は放電伸張によって接地電極から離れた箇所と比較的長い期間混合気にエネルギーを与えることで大きな火炎核を形成するのに対し、MSPD は押し流された火炎核の上流で新たな火炎核を形成し、それらが連なることで大きな火炎を形成する様子が確認された。



## 第4章 誘電体バリア放電の着火性評価

### 4.1 序論

希薄燃焼の実現に向けて燃焼室内の高流動化が提案されており、3章では多段パルス放電が高流動下での着火性改善に有効であることを確認した。多段パルス放電は単一の電極間で繰り返し放電を発生させる点火方法であるが、体積的に繰り返し放電を発生させることでさらなる着火性の改善に期待ができる。そこで、比較的簡素な構成かつ電極消耗せずに体積的な放電を実現できる方法として誘電体バリア放電 (DBD) に着目する。1章でも述べたように DBD による点火を試みた先行例は非常に少なく、希薄燃焼時の点火特性を評価した報告はなされていない。また、着火の可視化による着火メカニズムについて議論された例もなく、DBD 点火においては基礎的な特性や現象はほとんど明らかにされていない。そこで本章では、これまでに明らかにされていない希薄燃焼時の特性を示すとともに、得られた可視画像から着火性改善に向けて議論した内容を述べる。

まず、製作した評価用 DBD プラグおよび交流電源を用いて、空気雰囲気における昇圧環境下での DBD を観察し、昇圧によって DBD がフィラメント化する現象について考察を行う。続いて、圧力および空気過剰率を変更した点火実験を実施し、圧力によって DBD 点火の希薄限界が変化する特性について説明する。体積的な繰り返し放電によってしわ状の火炎を有することを確認した可視画像を示すとともに、着火過程の観察および考察によって DBD 点火の着火性改善の指針を得た結果を述べる。

### 4.2 DBD の原理と狙い

実験装置の説明に先立って、DBD の原理および本点火方法の狙いについて述べる。

DBD とは、誘電体を介在させた電極間に交流電圧を印加することで非平衡プラズマを繰り返し発生させる放電である。図 4.1 を用いて DBD の原理を説明する。例えば、陽極を誘電体で覆い陰極に高電圧を印加した場合、図 1.7 でも示したような従来の放電と同様に電子なだれが発生し始めるが、電子は誘電体を通過することができないため、誘電体表面に滞在して逆電界を発生する。すると逆電界により放電プロセスが急速に停止され、結果としてアーク放電には至らず極短時間でのみ非平衡プラズマが生成されることとなる。放電 1 回が短パルス電源によるストリーマ放電と同様にとらえることができるが、DBD の場合は交流電圧を印加しているため、印加電圧が上昇している間は放電が繰り返し発生する。電圧の極性が反転した際には反対向きの放電が発生するため、交流電圧を印加している間は断続的に非平衡プラズマが生成される。

3章では限定的な放電路において、繰り返し放電の観点から原理を述べたが、DBD の大きな利点は体積的に放電経路が形成されることにある。図 4.2 に DBD の電極構造の例を示す。図 4.2 左図は他分野で一般的によく採用される DBD の電極構造であり、両電極を誘電体で覆い 2つの誘電体の間で DBD を発生させる。しかしながら、両電極に誘電体を配置す

る構造を点火プラグで実現するのは難しいため、本章では図 4.2 右図に示すような、片方の電極のみを誘電体で覆い他方は金属電極を露出させる構造を採用する。電極間において完全に均一とはならないが、金属電極を複数設けることにより十分に体積的な放電が可能である。

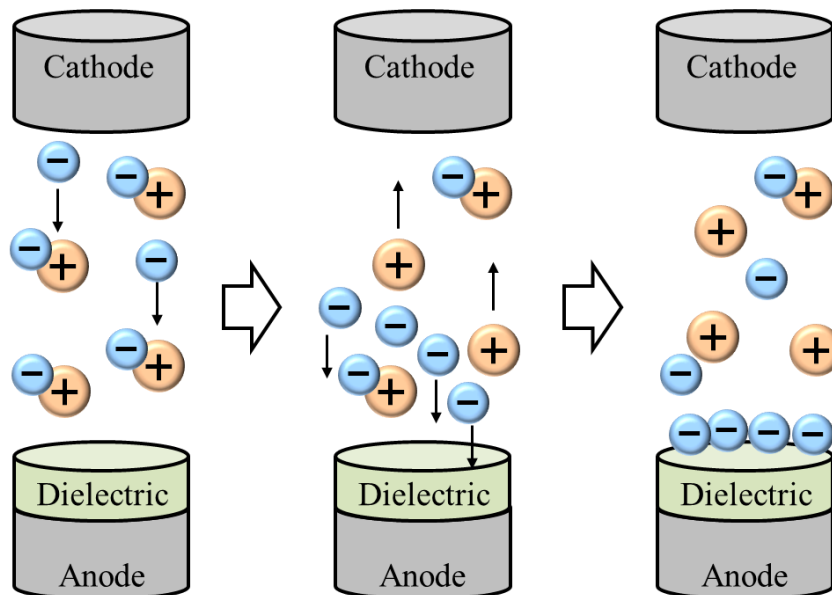


Fig.4.1 Mechanism of DBD

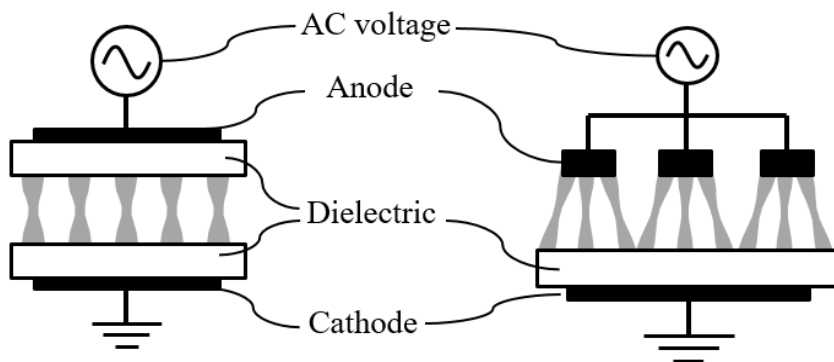


Fig.4.2 Example of structure of DBD electrode

先述したように DBD では体積的な放電が可能であるため、単一の放電経路を有する点火と比較して大きな初期火炎核を形成することができ体積的な点火を実現できる。図 4.3 に示す想定する放電領域の概略図を用いて、DBD 点火で期待する体積的な点火過程を説明する。点火プラグが円筒形であることを踏まえて同軸構造の放電領域を想定し、中心から外周方向へ中心側電極、誘電体、放電領域、外周側電極が順に配置される構造である。つまり、DBD

の放電領域は中空円筒形状ととらえることができる。放電領域を空気と仮定して、式(4)により投入エネルギーと温度上昇の関係を求めることができる。

$$Q = mC \Delta T = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) L \rho C \Delta T \quad (4)$$

式(4)において、 $Q$  は投入エネルギー、 $m$  は質量、 $C$  は空気の比熱、 $\Delta T$  は温度上昇を示している。また、質量 $m$  は放電領域の外径 $d_o$ 、内径 $d_i$ 、軸方向長さ $L$ 、空気の密度 $\rho$  から算出している。ここで、温度上昇を概算するために、プラグのネジ径や放電ギャップを踏まえて外径 $d_o$ 、および軸方向長さ $L$  をそれぞれ 10 mm、内径 $d_i$  を 9 mm と仮定すると、投入エネルギー 100 mJ で温度上昇約 515 K という値が得られる。温度上昇の概算結果に加え、実際には流動や電極への冷却損失が加味されることを踏まえると、放電領域全体で着火させるには相当量のエネルギーを要することが分かる。つまり、放電を完全に均一化するのではなく、放電領域において不均一なエネルギー分布を形成し、ある程度燃料の反応熱も利用しながら放電領域全体で初期火炎核を形成するような着火形態が基本的な指針になる。不均一なエネルギー分布を形成する観点からも、先述した図 4.2 右側に示すような電極構造が望ましいと考えられる。

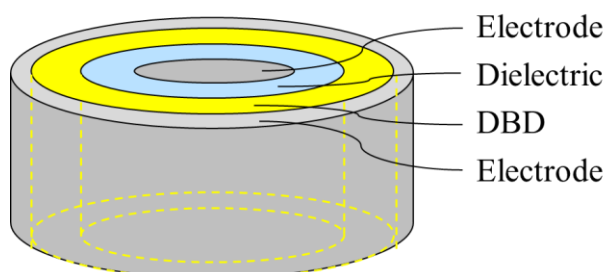


Fig.4.3 Schematic diagram of the DBD area

## 4.3 実験装置

### 4.3.1 DBD プラグ

本節では、主要な実験装置として DBD プラグ、交流電源、および定容燃焼容器に分けてそれぞれの概略を述べる。

本章で用いた DBD プラグの概略図を図 4.4 に示す。ベースとなるプラグには量産品相当の針-針電極型の点火プラグを用いており、中心電極の先端を切断し、耐熱性の樹脂でコーティングする。本章では、定容容器による単発燃焼を対象としているため実験結果に影響を与えないと考える。続いて、L 字の接地電極を切断し、ねじ部分にスリット加工を施すことにより、幅約 1.4 mm、長さ 6 mm の 4 本の棒状の接地電極を設ける。中心部の誘電体には軸方向にテーパがかかっており接地電極とは平行でないため、放電ギャップは軸方向距離

によって異なる。棒状接地電極の先端では約 1.4 mm であり、根元では約 1.0 mm である。上述した構造によって、接地電極が設けられた領域で DBD を発生させ、スリットから初期火炎核を成長させる狙いである。

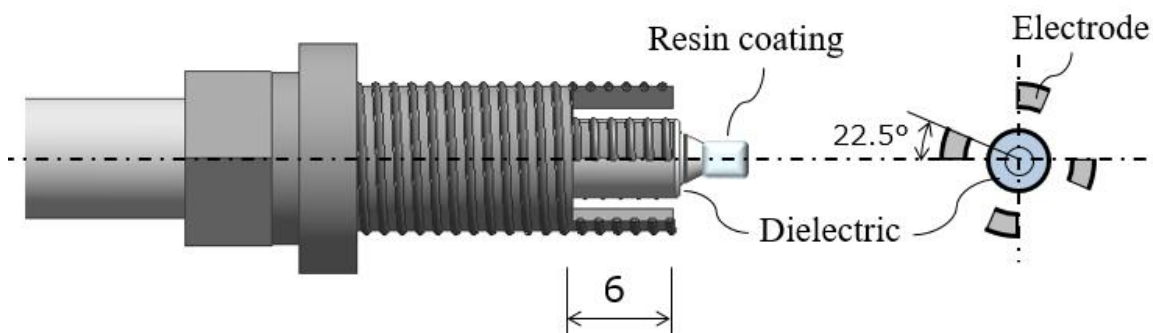


Fig.4.4 Schematic diagram of the DBD plug

#### 4.3.2 交流電源

本節では DBD に用いる交流電源について概略を説明するとともに、放電電力の測定結果について述べる。

製作した電源の回路図を図 4.5 に示す。汎用直流電源により出力する直流電圧をフライバック式のインバータで交流電圧に変換し、昇圧トランスで電圧を上昇させる。その後、昇圧トランスの高電圧側に直列接続したリアクトルおよび DBD プラグ間での共振作用によりさらに電圧を上昇させる。交流電圧の周波数は 40 kHz で設定し、リアクトルについても 40 kHz 付近で共振するように製作する。また、本章では放電時間を 3.0 ms に固定するために、交流電圧は 120 周期で固定する。印加電圧に関しては、DBD プラグ先端の樹脂部の耐電圧の都合から 15 kV<sub>0-p</sub> とする。実際に DBD プラグに印加した電圧波形を図 4.6 に示す。

電圧および電流波形から DBD の消費電力を測定するためには急峻な微小電流を正確にとらえる必要があるため、本章では簡易電力計測としてリサージュ図を用いた方法を採用する。DBD プラグと対地電位間に流入電荷量  $Q$  を測定するための静電容量  $C_q$  を有するコンデンサを設け、出力電圧  $V_p$  およびコンデンサ電圧  $V_c (Q = C_q V_c)$  から  $V-Q$  リサージュを取得する。 $V-Q$  リサージュ図の面積は一周期の電力を表すため、面積から DBD プラグでの消費電力を算出することができる。取得したリサージュ図を図 4.7 に示す。1 周期あたりの消費電力は 3.0 mJ であり、1 回の点火として設定した 120 周期では 360 mJ に相当する。ただし、DBD プラグ内部の抵抗による損失や誘電損失なども含んだ値である。また、図 4.6 の電圧波形が正弦波であることに加えて、図 4.7 のリサージュ図が DBD の代表波形である平行四辺形となっていることから、本装置で DBD が発生していると判断することができる。

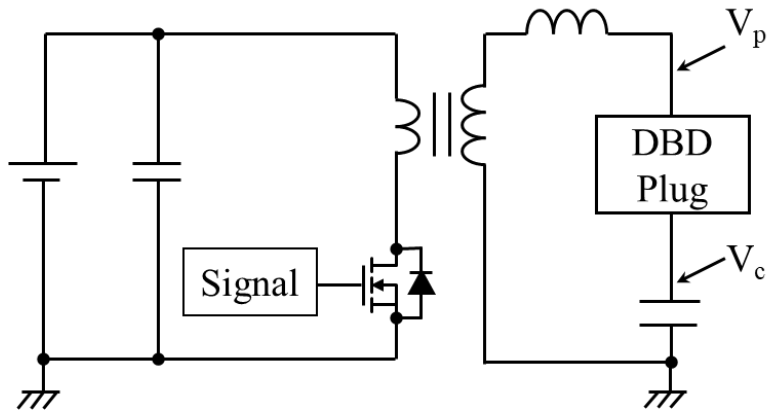


Fig.4.5 Schematic diagram of the power supply for the DBD

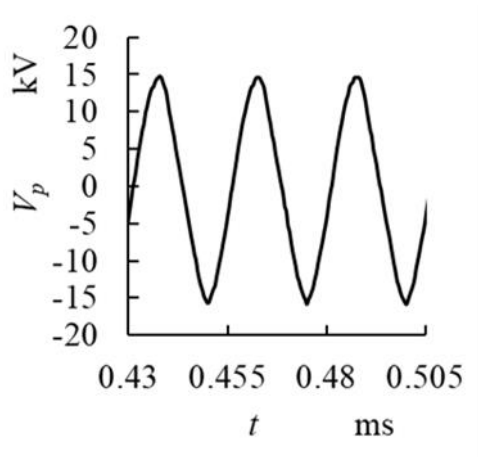


Fig.4.6 Voltage waveform

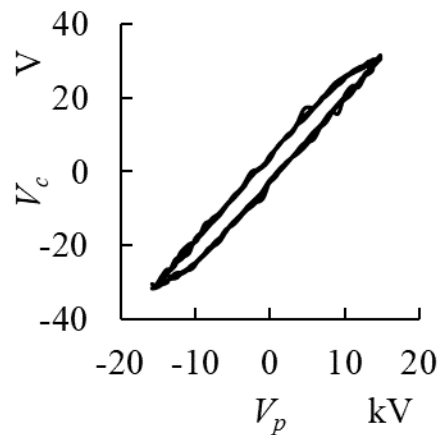


Fig.4.7 Lissajous figure

### 4.3.3 燃焼容器

本章で使用する実験装置の概略を図 4.8 に示す. 基本的な構成および燃焼容器の形状は 2 章で示した実験装置と同様である. 攪拌機を装着した混合容器(1000cc)に予め乾燥空気およびブタンを混合しておき, そこから内径 40 mm 長さ 100 mm の燃焼容器に所定量充填する. 燃焼容器には DBD プラグを装着しており, 混合気充填後に放電させた様子を高速カメラで撮影する. なお, 混合容器および燃焼容器は室温としている.

放電観察実験では高速カメラで直接的に放電を撮影するが, 燃焼実験では, 初期の火炎核を明確にとらえるためにシュリーレン法を用いて撮影する. いずれの撮影においても, 撮影速度 10,000 frame/秒, 露光時間 1/10,103 秒に設定した. 図 4.9 にカラーフィルターを用いたシュリーレン光学系の概略図を示す. 2 章の流速測定で示したシュリーレン光学系に対して, ナイフエッジの代わりにカラーフィルターを配置している. カラーフィルターは中心部から外側に向かって青, 橙, 赤の順に色が変わる同心円状となっており, 未燃部は青色, 既燃部は橙色または赤色として撮像される.

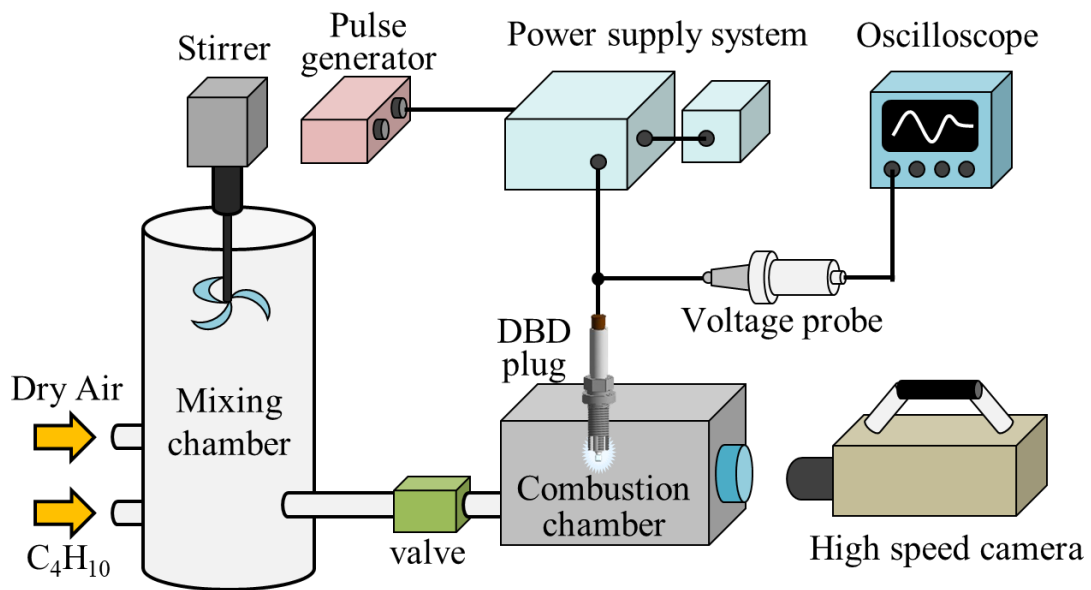


Fig.4.8 Schematic of experimental apparatus

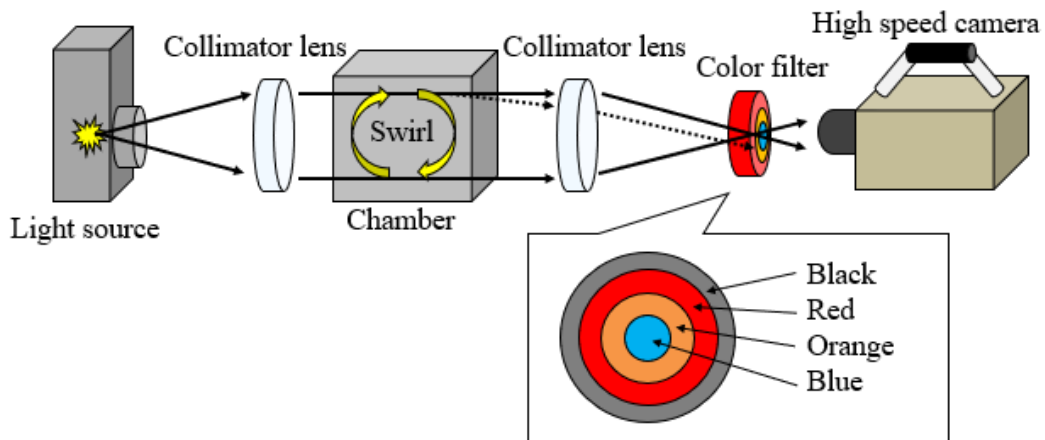


Fig.4.9 Schlieren photography with color filter

#### 4.4 昇圧環境下における DBD 特性

本節では、燃焼実験に向けて事前に実施する DBD の観察実験について述べる。製作した装置を用いて、大気圧環境での基本的な DBD の挙動について議論した後に、圧力の影響について評価する。なお、交流電源の設定条件については、4.3 節で記載したように最大電圧 15 kV<sub>0-p</sub>、周波数 40 kHz、放電時間 3.0 ms として全ての実験で統一する。

図 4.10 に大気圧の乾燥空気下で撮影された DBD 撮影画像の様子を示す。画像右上 45 度から DBD プラグが装着されており、接地電極 6 mm が燃焼室に突き出している状態である。

撮影については、高速カメラの露光時間が  $1/10,103$  秒であるため、おおよそ交流電圧の 4 周期分の放電を 1 枚の画像として撮影している。図 4.10 から、誘電体および接地電極間において、意図したとおり複数箇所でも DBD が発生していることが分かる。また、誘電体の表面でもわずかに発光している様子が観察できる。本章では誘電体表面に沿った放電を沿面放電、誘電体および接地電極間の放電を気中放電と定義する。なお、DBD の挙動としては、少なくとも  $3.0$  ms の放電時間では時間経過によって大きく変化しないことが図 4.10 から確認できる。

気中放電に着目すると、1 つの接地電極から 3~5 本程度の放電路が存在することが分かる。特に、接地電極の先端からは常に発生しており、接地電極先端の電界集中に起因するものと考えられる。燃焼室の中心に近い箇所、すなわち、より燃焼室に突き出した箇所で点火できることが望ましいため、電極先端に放電が集中する傾向は点火に有利であると考えられる。

一方、沿面放電は誘電体の表面全域を覆うように発生していることが確認できる。沿面放電は、放電と電極との接触面積が気中放電に比べて大きく、電極への冷却損失が大きいと推測できる。しかし、沿面放電では気中放電よりも広い領域で放電するために、体積的な着火には効果的であると考えられる。

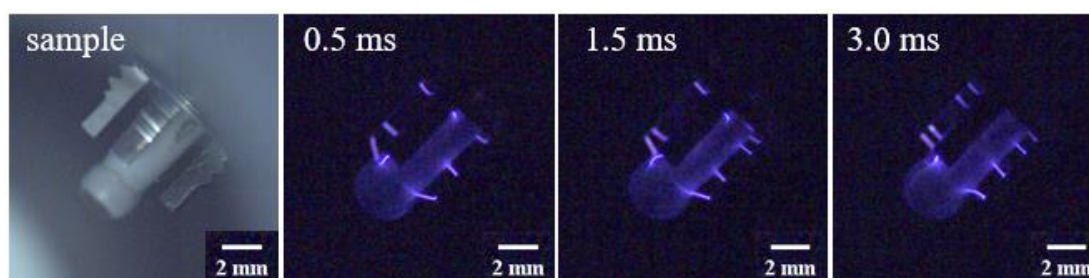


Fig.4.10 DBD at atmospheric pressure

続いて、図 4.11 に大気圧から  $8$  atm まで上昇させた際の DBD 撮影画像を示す。圧力を上昇させると、 $5$  atm 付近から明確に放電の挙動が変化の様子が確認できる。圧力が高くなるほど気中放電路の本数が減り、放電路 1 本あたりの発光強度、すなわち放電エネルギー密度が高くなる傾向を示している。また、図 4.11 (d) に示す  $8$  atm の条件では、気中放電は 1 か所からしか確認されない。交流電圧 4 周期の画像であることを踏まえると、毎周期で同じ箇所から DBD が発生していると判断できる。圧力が高くなるほど、電界強度がより高い箇所に DBD が集中する傾向を示しており、放電経路の過度な集中は体積着火の観点では望ましくない。電圧をより高くする、もしくは接地電極との放電ギャップを縮小することで改善が可能であると考えられる。放電ギャップを縮小した場合は電極への冷却損失の増大が懸念されるため、点火においては最適な放電ギャップが存在するものと推測される。

一方、沿面放電について考察するために、図 4.11 (a) および (d) における誘電体表面の拡大画像を図 4.12 (a) および (b) にそれぞれ示す。大気圧では誘電体表面の全域が均一に発

光するのに対し、8 atm では強い発光を有するフィラメント状の放電路が形成されている様子が確認できる。昇圧による沿面放電の発光強度の変化を比較するために、図 4.13 に示す A 点および B 点間の直線上の輝度分布を図 4.14 に示す。横軸は A 点の位置を 0 とした時の位置  $xd$ ，縦軸は最大 255 で取得した輝度値  $br$  としている。図 4.14 から分かるように圧力が高い条件ほど鋭いピークを有する発光箇所が存在することが確認され、昇圧するほど DBD のフィラメント化が顕著となることが分かる。

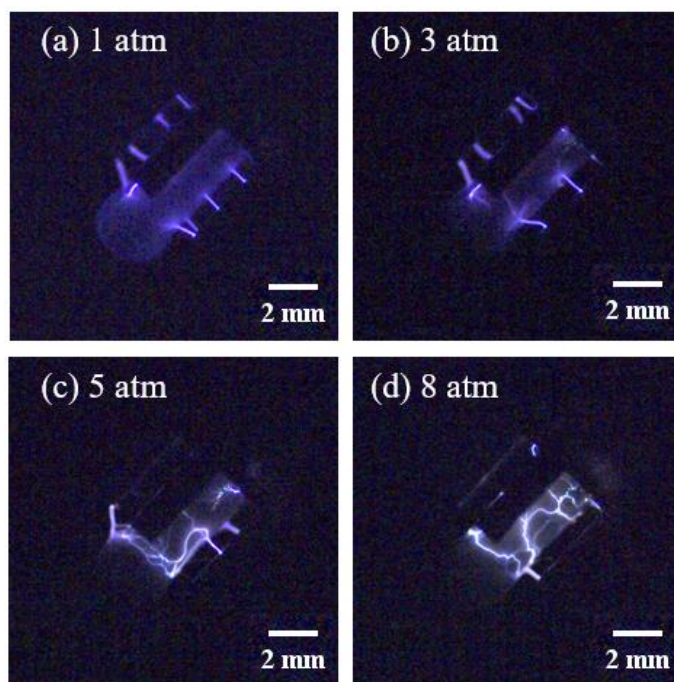


Fig.4.11 DBD at elevated pressure condition

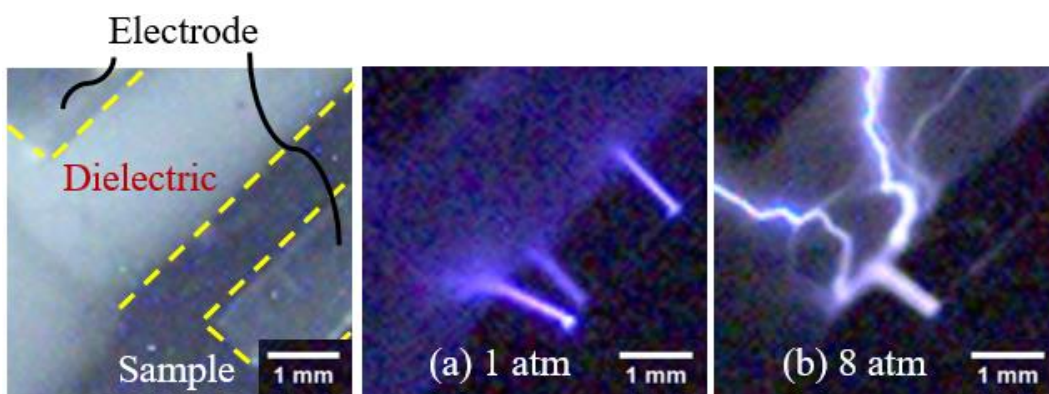


Fig.4.12 Discharge on dielectric (Magnitude)



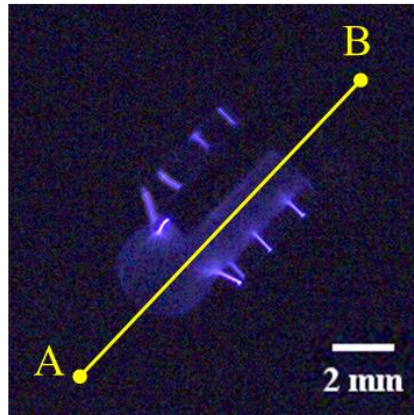


Fig.4.13 Position of the line for extracting brightness

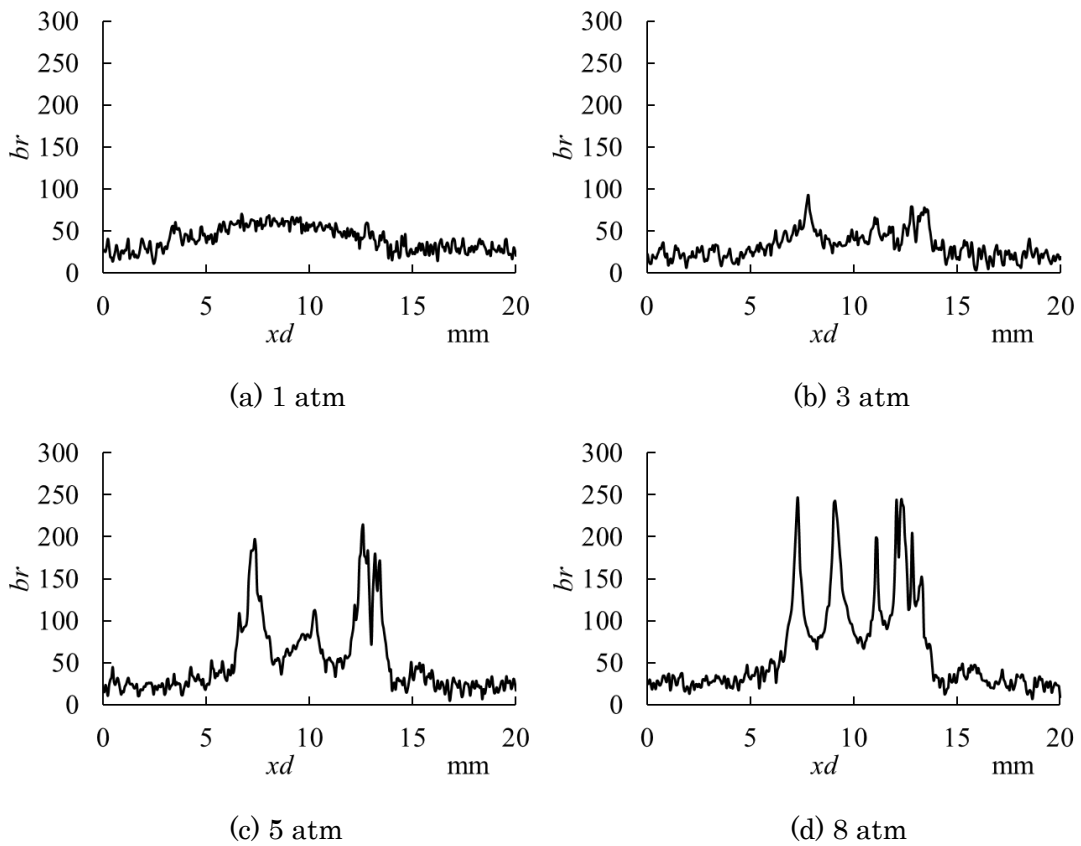


Fig.4.14 Brightness on the dielectric at elevated pressure condition

#### 4.5 DBD 点火特性

本節では、前節で観測された DBD の挙動が燃焼に及ぼす影響について述べる。最初に DBD 点火の圧力および空気過剰率の影響を評価し、その後、着火過程について議論する。実験条件を表 4.1 に示す。空気過剰率を 1.00～1.20 で設定し、各空気過剰率において徐々に圧力を上昇させながら点火の可否を判断する。電源条件は前節と同様である。

Table.4.1 Experimental condition

No.	Excess air ratio [ - ]	Number of Experiments [ - ]	Pressure range [atm]
1	1.00	23	1.18 ~ 3.36
2	1.10	15	1.26 ~ 3.53
3	1.15	13	1.34 ~ 3.70
4	1.20	17	1.51 ~ 4.20

図 4.15 に点火可否の結果を示す。横軸を圧力  $p$ ，縦軸を空気過剰率  $\lambda$  としており、○印は着火した条件、×印は着火しなかった条件を示している。また、各空気過剰率において着火した最小圧力および着火しなかった最大圧力をそれぞれ点線で示している。

まず、空気過剰率  $\lambda=1.00$  の条件に注目すると、大気圧では着火しないものの、圧力を上昇させていくと約 1.3 atm で着火することが分かる。4.4 節の結果で述べたように、昇圧により放電路 1 本あたりの放電エネルギー密度が上昇する傾向がある。本実験条件では 1.3 atm 付近で着火に必要な放電エネルギー密度に到達したものと推測する。空気過剰率  $\lambda$  の上昇に伴い、着火する圧力のしきい値が高くなる傾向を示し、最も希薄化した空気過剰率  $\lambda=1.20$  の条件では、2.2 atm 以下の圧力では着火が確認されていない。上記傾向から、DBD 点火では燃料が希薄になるにつれて、より高い放電エネルギー密度が必要であることが示唆される。また、空気過剰率  $\lambda$  の上昇に伴い、着火した最小圧力と着火しなかった最大圧力の差が大きくなる傾向が図 4.15 から読み取れる。したがって、低い圧力で燃料が濃い条件と高い圧力で希薄な条件とでは、着火に至らない原因が異なっている可能性が示唆されており、考察についてはシュリーレン画像と併せて後述する。

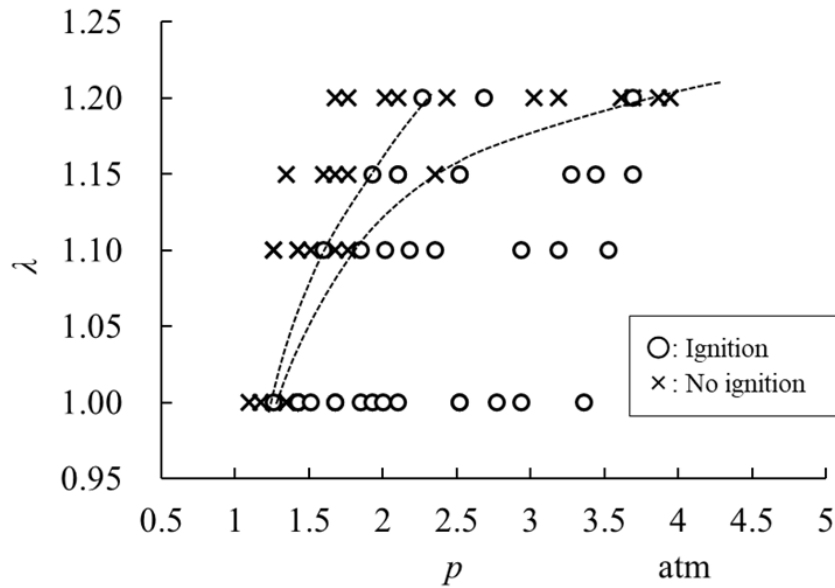


Fig.4.15 Characteristics of DBD ignition at elevated pressure condition

続いて、シュリーレン撮影による DBD の着火過程の考察を行う。まずは、昇圧環境下における特性について、その後、希薄条件での挙動について議論する。

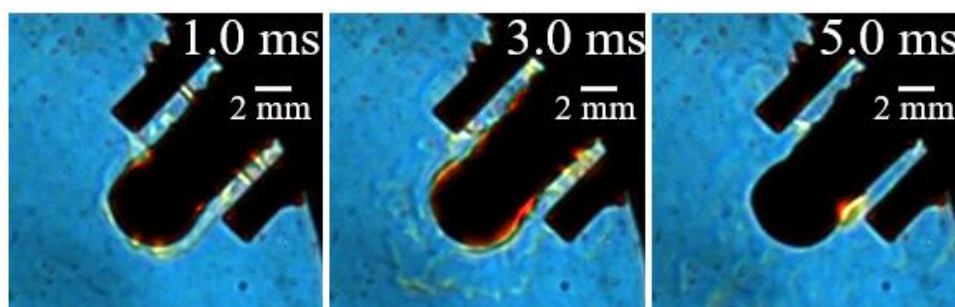
図 4.16 に空気過剰率 $\lambda = 1.00$ における、圧力 $p$  (a) 1.2 atm, (b) 1.7 atm, (c) 3.4 atm の取得画像を示す。(a) は着火しなかった条件、(b) は比較的低圧力で着火した条件、(c) は比較的高圧力で着火した条件である。画像は放電開始時を起点として 1.0 ms 後、3.0 ms 後、5.0 ms 後を示しており、画像右上から装着されたプラグ近傍を拡大表示している。なお、4.4 節で示した直接撮影ではなく、カラーシュリーレン撮影により気体の密度勾配を可視化していることに注意されたい。

図 4.16 (a)より、1.0 ms 時には気中放電の経路で、また、3.0 ms 時には誘電体先端の表面で変化しているものの、全体として気体が密度勾配を持つ領域の変化はわずかであることが分かる。その後も、気体の密度勾配をもつ領域は、空間中に広がっていく傾向は見られず、着火に至っていない。本実験で得られた画像から、放電経路においてもほぼ発熱が生じていないことが分かる。すなわち、本条件における DBD は初期火炎が形成できないほど放電エネルギー密度が小さいことを示している。

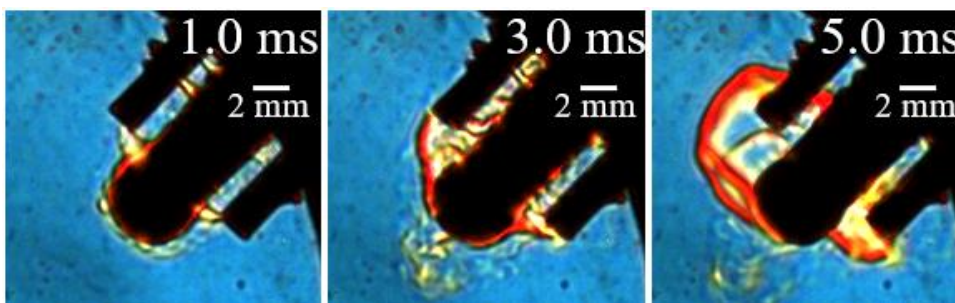
続いて圧力を 1.7 atm まで上昇した図 4.16 (b) 1.0 ms 時点における画像から、気中放電による気体の密度勾配を確認することができる。その後、3.0 ms 時には、初期火炎核と見られる領域が誘電体表面の全体を覆うように形成されているが、5.0 ms 時には DBD プラグの先端部のみで着火したような火炎核が形成されている。前述したように DBD は接地電極先端に集中する傾向があるため、電極先端で着火したものと考えられる。

圧力を 3.4 atm まで上昇させた図 4.16 (c) 1.0 ms 時の画像では(b)の画像と比べて、気中放電経路におけるより明確な密度勾配が確認できる。また、この時点において、初期火炎核と見

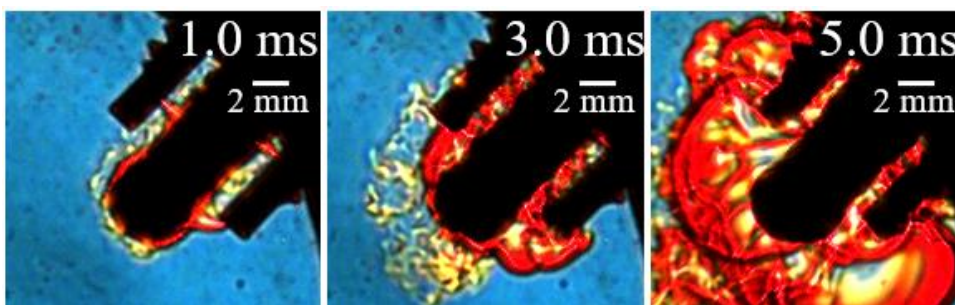
られる領域が誘電体表面に形成されている。誘電体表面の初期火炎核は 3.0 ms 時には周囲に拡大しており、DBD プラグ全域で体積的に着火している様子が確認できる。画像右下に位置する接地電極の先端で火炎が先行して成長している様子から、気中放電部を中心として初期火炎が成長したものと推測する。すなわち、本条件における DBD 点火では、沿面放電により誘電体表面に初期火炎核が形成され、気中放電は誘電体表面に形成された初期火炎核の成長を促進していると考えられる。沿面放電による初期火炎核は誘電体を覆うように形成されるため誘電体による冷却損失の影響を強く受けていることが予想され、エンジン内のようなプラグ温度が高い環境ではより速く初期火炎核が成長するものと考えられる。



(a) 1.2 atm



(b) 1.7 atm



(c) 3.4 atm

Fig.4.16 DBD ignition at elevated pressure condition

空気過剰率 $\lambda = 1.00$ , 圧力 $p = 3.4 \text{ atm}$ の条件において, 得られた $5.0 \text{ ms}$ 以降のシュリーレン画像を図4.17に示す. 図4.17より,  $5.0 \text{ ms}$ においても, 形成された火炎核の表面は複雑な形状を有しており, 火炎核が十分に成長した後でも, 複雑な火炎形状を維持していることが分かる. 着火時において, 複数箇所で見られる気中放電により複数の初期火炎核が複雑に融合した結果によるものと推測され, 燃焼速度の点において有利であると考えられる.

続いて, 昇圧環境下におけるDBD着火について詳細に議論するために, 画像解析を実施する. 画像から疑似的な燃焼時間を算出し, 空気過剰率 $\lambda = 1.00$ で着火した条件における圧力の影響を評価する. 取得画像 $0.1 \text{ ms}$ ごとに解析を行い, 赤色の輝度が一度でも所定値を超えた領域を「既燃領域」と定義する. 本解析では, 放電開始時を起点としてプラグを除く領域の70%が既燃領域となる時の時刻 $\tau$ を比較する. 代表例として図4.16(c)の条件における時刻 $\tau$ の2値化画像を図4.18に示す.

図4.19に画像解析結果を示す. 横軸は圧力 $p$ , 縦軸は時刻 $\tau$ としている. 本結果から, 圧力が約 $1.4 \text{ atm}$ から約 $2.2 \text{ atm}$ の範囲では約 $2.5 \text{ atm}$ 以上の範囲と比べて所要時間が長くなる傾向が確認できる. 図4.16(b), (c)で示した傾向と同様に, 後者は誘電体全域で体積的に着火するのに対し, 前者は誘電体の先端のみで着火していると考えられる. つまり, 昇圧していくと, 電極先端のみで着火に至る圧力しきい値と, 沿面放電による初期火炎核も含めた体積的な着火が可能な圧力しきい値とがそれぞれ存在するものと考えられる.

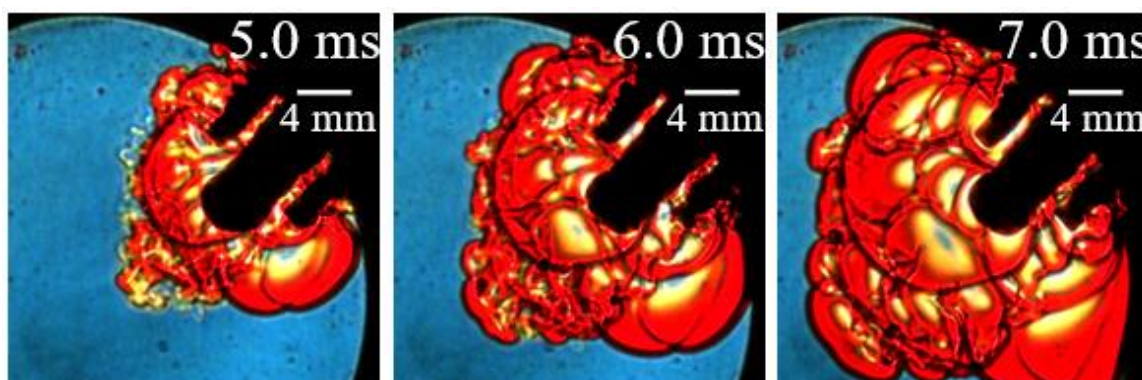


Fig.4.17 Flame propagation by DBD ignition

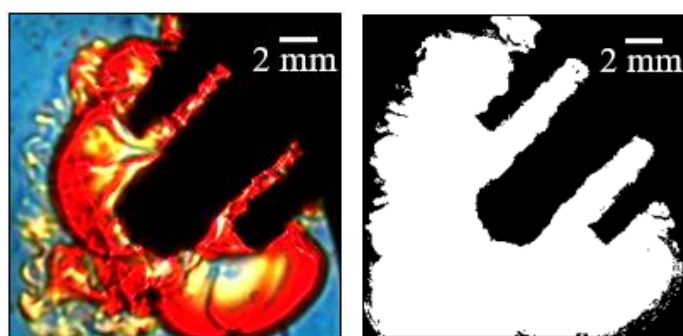


Fig.4.18 Binary image by image analysis

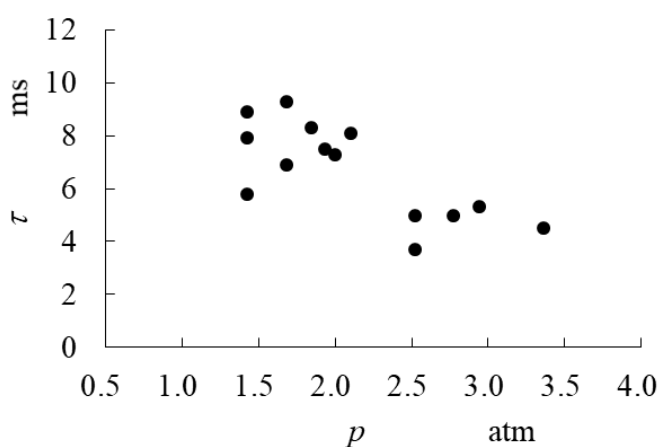


Fig.4.19 Combustion time calculated by image analysis

最後に、希薄燃焼時の DBD 点火の挙動について考察する。図 4.20 は空気過剰率 $\lambda = 1.20$ の時の、(a) 着火しなかった条件(3.7 atm), および (b) 着火した条件(2.7 atm)の取得画像を示している。

(a) 1.0 ms 時の画像から、気中放電の領域で気体の密度変化が明確に生じていることが分かる。その後、3.0 ms 時には誘電体表面の全域で気体の密度勾配が観察できるが、5.0 ms 時には消失している様子が確認できる。形成された初期火炎核が成長する過程において電極への冷却損失が火炎伝播による発熱速度を上回ったことにより消失したものと推測でき、圧力が低いことで着火に至らなかった図 4.16 (a) の結果とは異なる現象であることが示唆される。熱伝導解析と併せて議論することで現象をより明らかにできると考える。一方、着火した条件である (b) 3.0 ms を見ると接地電極先端で初期火炎核が形成されている様子が確認できる。本結果は、偶発的に気中放電が集中する箇所が存在したことで着火に至ったものと考えられる。

以上の結果から、低圧力条件は低放電エネルギー密度により着火に至らないのに対し、希薄環境では電極への冷却損失により着火に至らないものと推測する。電極形状を工夫することで希薄環境での着火特性が改善できると考える。

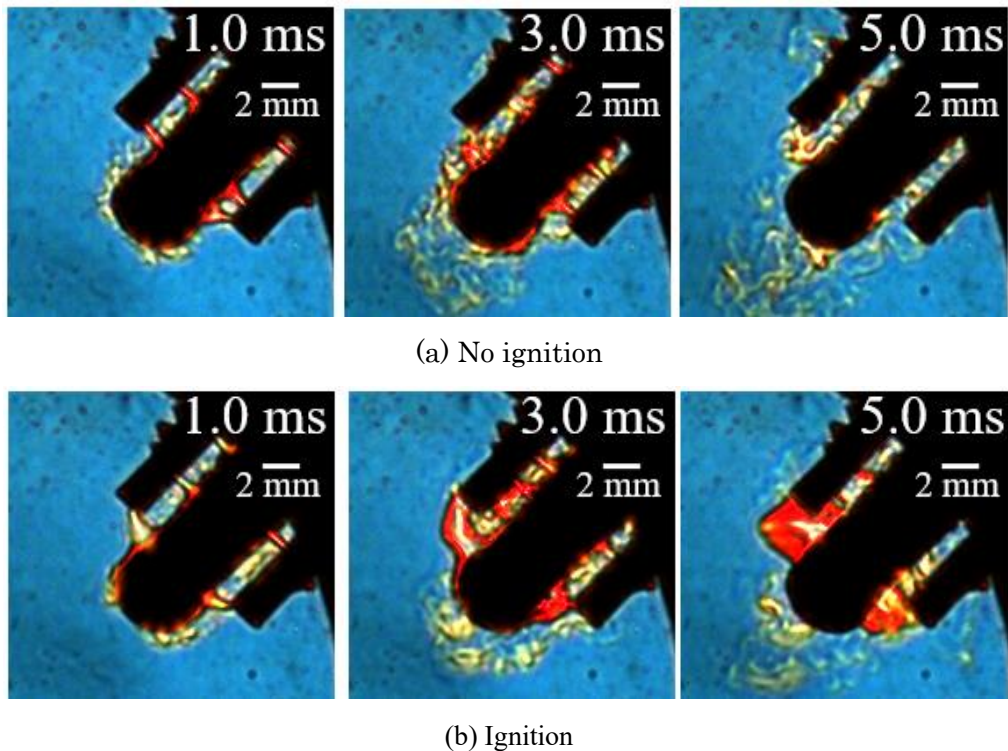


Fig.4.20 DBD ignition at lean condition

#### 4.6 結論

誘電体バリア放電を用いた点火装置を製作し、定容燃焼容器を用いて希薄燃焼時の点火特性を評価した。また、取得した可視画像から着火過程について議論した。得られた知見を示す。

- (1) 誘電体バリア放電による点火は、ある一定以上の圧力で着火に至る特性を有する。その要因は圧力上昇により放電路 1 本あたりの放電エネルギー密度が上昇するためだと考えられる。
- (2) 混合気が希薄化するほど、上記の点火可能となる圧力のしきい値は高くなる。
- (3) 体積的な着火が可能であることをシュリーレン撮影により確認した。沿面放電により誘電体表面を覆うような初期火炎核が形成され、気中放電を起点として初期火炎核が成長する着火メカニズムであると考えられる。
- (4) 誘電体バリア放電による点火によって形成された火炎は複雑なしわを有することが判明し燃焼速度の向上に期待できる。
- (5) 電極への冷却損失がより小さい電極構造とすることで、DBD 点火の希薄限界が向上すると考えられる。

## 第5章 HCCI 燃焼への応用

### 5.1 序論

希薄燃焼の実現において、4章までに述べた高流動化とは別の手段として HCCI 燃焼が提案されている。希薄予混合気を高圧縮比で圧縮することにより燃焼室内全域で一気に自着火させるため、火炎伝播しないような燃料希薄条件でも短時間で燃焼を成立させることが可能となる。しかしながら、HCCI 燃焼では運転可能範囲が空気比や吸気温度によって限定されることが課題である。燃焼室にオゾンを供給することにより希薄限界の拡大および必要な吸気温度の低減が報告されているが<sup>(12)(13)(14)(15)</sup>、実際のエンジンへの適用を想定したオゾン発生方法の議論や吸気温度および湿度がオゾン発生量に与える影響の評価はなされておらず、実用化の検討には踏み込まれていない。また、HCCI 燃焼では急加速時などで負荷が急変した場合は意図したタイミングで自着火せず、場合によっては失火に至る。また運転領域が限定されるだけでなく負荷変動時の燃焼の不安定化も課題である。

一方で、4章で述べた DBD はオゾンの発生方法としても広く活用されている。そこで本章では、点火とは異なる DBD の活用方法の一つとして HCCI 燃焼への応用を試みる。先行例では踏み込まれていないエンジン適用に向けた実用化の検討を行うことを目的とし、吸気管に取り付け可能なインライン型オゾナイザを製作する。吸気管への取り付けに適したオゾン発生器の構造に関する議論も重要であるが、特に吸入空気の色度および湿度がオゾン発生量に与える影響を評価した先行研究は見受けられず、実用化に向けて確実に明らかにすべき点である。

本章では、吸気管への装着が可能なインライン型オゾナイザ（以下、オゾナイザ）を製作し、吸入空気の色度および湿度がオゾン発生量に与える影響を明らかにした。続いて製作したオゾナイザを用いて HCCI 燃焼の促進効果を確認した。最後に、通常では失火する過渡的な運転条件におけるオゾナイザの有効性を確認し、HCCI 燃焼における燃焼制御方法としての可能性を示す。

### 5.2 オゾナイザシステム

#### 5.2.1 システム概要

製作するオゾナイザの概略図および仕様を図 5.1 に示す。オゾナイザは筐体、オゾン発生器、電源で構成され、オゾン発生器は筐体内部に、電源は筐体外部に配置する。筐体は吸気管への装着とし、温度 60℃、露点 20℃、流量 200 L/min の吸入空気に対してオゾン濃度 50 ppm (1.28 g/h) の生成を目標とした。目標オゾン濃度は過去の文献を参考とした<sup>(14)</sup>。また、オゾナイザを通過する際の圧力損失については 0.5 kPa を目安とした。



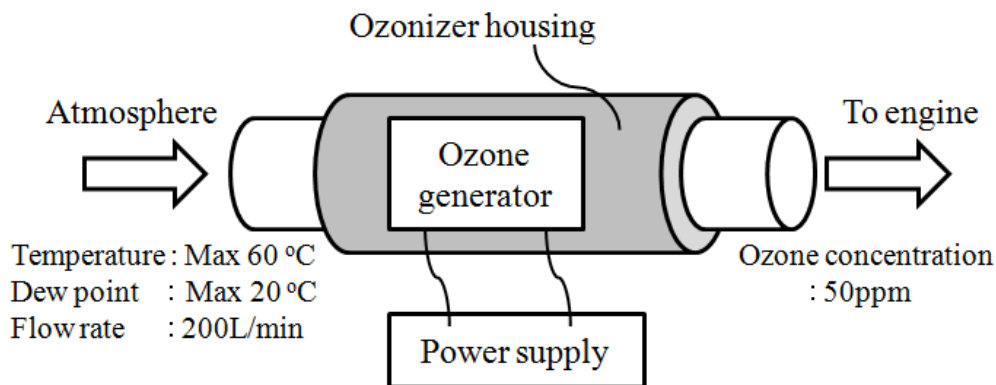


Fig.5.1 Schematic and specification of the ozonizer system

筐体は円筒形としており、全長 320 mm、外径 75 mm、内径 65 mm である。エンジンに使用される一般的な吸気管よりも径を大きく取っているため、継手を用いて接続する。ここで、全長に関しては実験時における計測機器の取り付けを考慮して長めに設計している。また、電極と筐体との間で放電が発生しないよう絶縁体とし、かつ内部の目視が可能となるよう透明である事が好ましいと考え、ポリカーボネート製とした。筐体円周部には高電圧端子および低電圧端子を設けてあり、オゾン発生器から引き出した高電圧線および低電圧線を電源に接続する。加えて、オゾン発生器の前後においてオゾン濃度や圧力損失の計測用ポートを複数配置している。5.2.2 でオゾン発生器について、5.2.3 で電源の概要についてそれぞれ述べていく。

## 5.2.2 オゾン発生器

オゾン発生器は、実際に誘電体バリア放電を発生させるパネル状の電極（以下、パネル電極）および電極の固定具で構成されている。

パネル電極において誘電体バリア放電を発生させ、オゾンを生成する。誘電体バリア放電は、誘電体を介して電極間に交流電圧を印加して発生する微小放電であり、広い空間において均一に放電できる点が特徴である。放電形態としては図 5.2 のように対向放電型 (Opposed discharge type) と沿面放電型 (Creeping discharge type) の 2 つに大別することができる。通常、水処理プラントなどで用いられるオゾンナイザでは発生効率の高い対向放電型が採用され、数 mm 以下の間隙で放電させてオゾンを生成する。しかし、流れ場においては圧力損失が増加することが短所であり、低減目的で間隙を広くすると必要電圧が高くなるため電源や絶縁構造への要求が厳しくなる。反対に、沿面放電型では誘電体表面に沿った放電を発生させるため、発生効率でやや劣るものの圧力損失および必要電圧の点で優位である。

上記特徴のもと、オゾンの発生量に関しては誘電体面積の拡張や投入電力の増加で補えると考え、本章では沿面放電型を採用した。

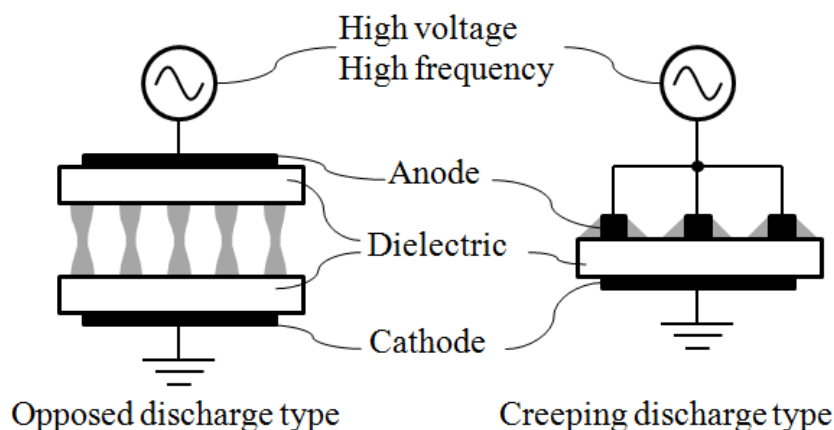


Fig.5.2 Opposed and creeping discharge type

沿面放電型としたパネル電極の概略図を図 5.3 に示す。構成要素としては、金属電極、誘電体、ガラスである。誘電体にはアルミナを使用した。金属電極は端子部分でオゾンにさらされる構造となっているため、耐食性の高い金 (Au) とした。アルミナを挟むように金電極を配置し、金電極を覆うようにガラスコートをしている。誘電体バリア放電は陽極側のガラス上で発生させ、放電部においてはオゾンおよび放電から金電極をガラスが保護する構造である。また、ガラス平面上でより均一な面放電を発生させるため、金電極はエッジ部の少ない形状とした。実際に放電させた時の写真を図 5.4 に示す。なお、図中の点線はオゾン発生器の輪郭線である。

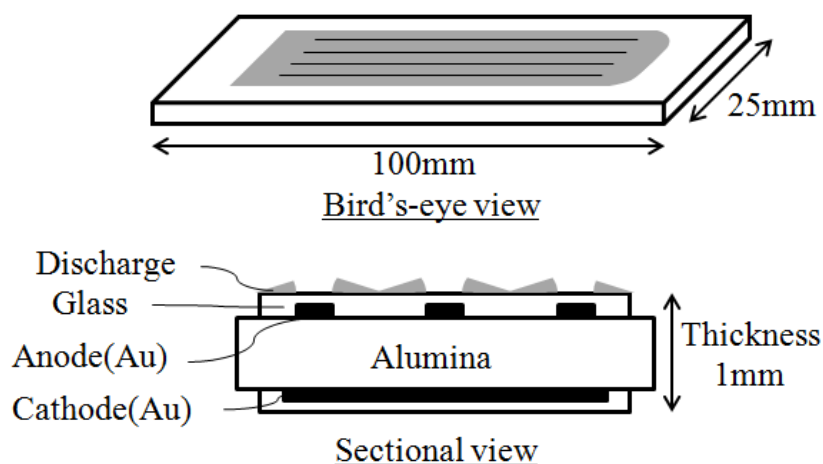


Fig.5.3 Electrode panel

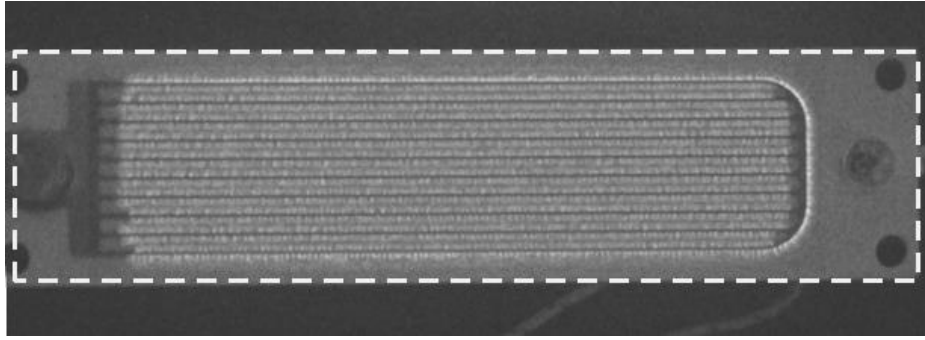


Fig.5.4 Discharge on an electrode panel

実際にパネル電極を筐体に取り付けた写真を図 5.5 に示す。パネル電極を複数枚用意し、筐体内部において多角形となるように固定し、放電面が内側を向くように配置した。吸入した空気のはほぼ全量が多角形構造の内側を通過し、オゾンが発生させる構造である。また、複数のパネル電極の取り付けには、エンジンの振動に耐え得るよう絶縁性の専用固定具を設けた。

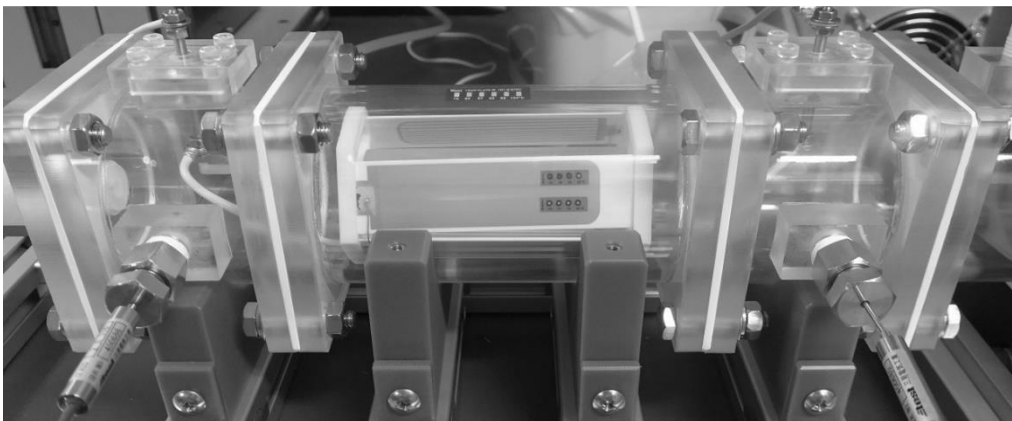


Fig.5.5 Ozone generator in the ozone housing

### 5.2.3 電源

本節ではオゾナイザ用に製作した電源の概略を説明し、放電電力の測定や調整について述べる。なお、電源の製作にあたっては、耐久性や実験時の使い易さを優先しており、エンジン取り付け位置やサイズなどは現段階では考慮していない。

製作した電源の概略図を図 5.6 に示す。自動車への搭載を想定するとバッテリー電圧から昇圧すべきであるが、実験の都合により省略し、汎用直流電源を用いて 200 V を出力した。出力した直流 200 V をインバータで交流に変換し、巻数比 10 の昇圧トランスで約  $1 \text{ kV}_{0-p}$  に増幅する。その後さらにリアクトルおよびオゾン発生器間の共振作用で約  $4.5 \text{ kV}_{0-p}$  に昇圧して出力電圧とした。その際、オゾン発生器の容量成分と数十 kHz 程度で共振条件となるようにリアクトルを設計した。また、オゾン発生器と対地電位間に発生器への流入電荷量 Q

を測定するためのコンデンサ  $C_q$  を設け, 出力電圧  $V_g$  およびコンデンサ電圧  $V_c$  ( $Q = C_q V_c$ ) から  $V-Q$  リサーチを観測する.  $V-Q$  リサーチ図の面積  $[QdV]$  は一周期の電力を表すため, 面積から発生器での消費電力を算出することができる.

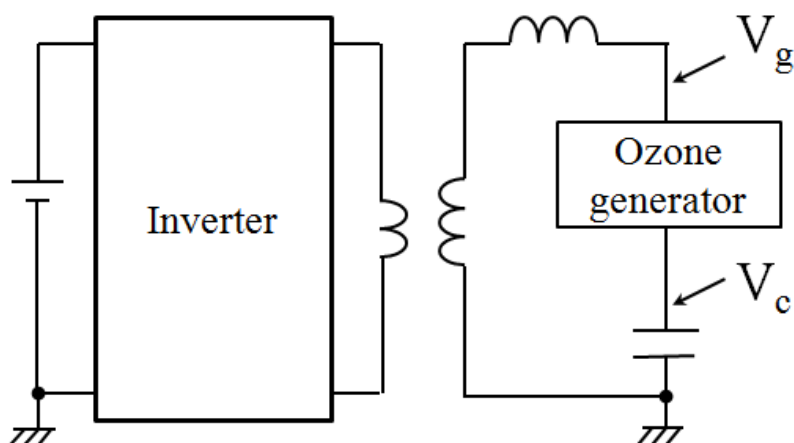


Fig.5.6 Schematic diagram of the power supply for the Ozonizer

オゾン発生器への出力電圧波形および電流波形を図 5.7 に,  $V-Q$  リサーチ図形を図 5.8 に示す. 共振周波数はおよそ 32 kHz であり, 出力電圧および電流は概ね正弦波を形成していることを確認した. また, オゾン発生器は容量性の負荷であるため, 電流の位相は電圧に対してほぼ  $90^\circ$  進んでいることが分かる.

一方,  $V-Q$  リサーチ図形は平行四辺形を示しており, 誘電体バリア放電の特徴を波形から確認できる. 平行四辺形の面積に周波数を掛けた値, すなわちオゾン発生器での消費電力は 150 W であった. よって, 本章で製作したオゾナイザへの投入可能電力は最大 150 W であり, 時間的に ON/OFF を繰り返すことによって出力調整を行うこととする.

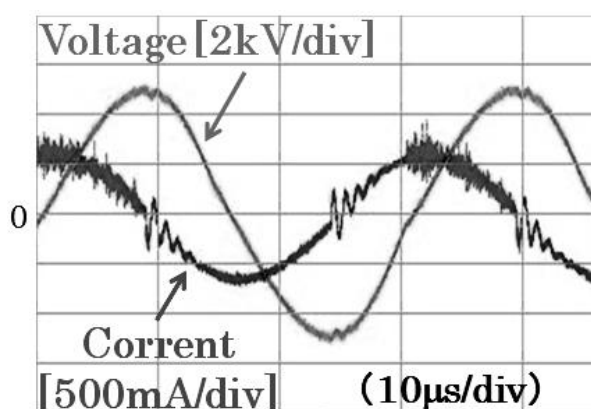


Fig.5.7 Output voltage and current

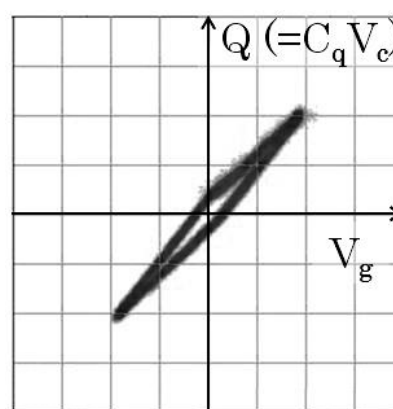


Fig.5.8 Lissajous figure

### 5.3 オゾン発生量測定試験

#### 5.3.1 試験概要

本節では HCCI 燃焼実験に向けて事前に実施したオゾン発生量測定試験について述べる。オゾン発生量は温度及び湿度に対して影響を受けることが分かっており<sup>(79)(80)(81)</sup>、各条件における投入電力とオゾン発生量の関係を予め明確にしておくは非常に重要である。なお、製作したオゾナイザの最大出力は 4 気筒エンジンを想定して決定したが、次節で述べる HCCI 燃焼実験は単気筒エンジンを使用するため、本実験では単気筒エンジンにおける流量域で実験を実施した。

図 5.9 にオゾン発生量測定試験の概略図を示す。乾燥空気に対してバブリング装置で湿度を、ヒータで気体温度を、流量調整弁で流量をそれぞれ管理する。条件調整後の空気をオゾン発生器に通す直前で各種条件を測定し、通過直後のオゾン濃度の測定を行う。また、圧力計でオゾン発生器の圧力損失を測定し、測定後のオゾンは触媒を通して排気する。なお、電源出力に関しては ON 時間を変更する DUTY 制御を 10Hz で繰り返すことにより調整を行う。

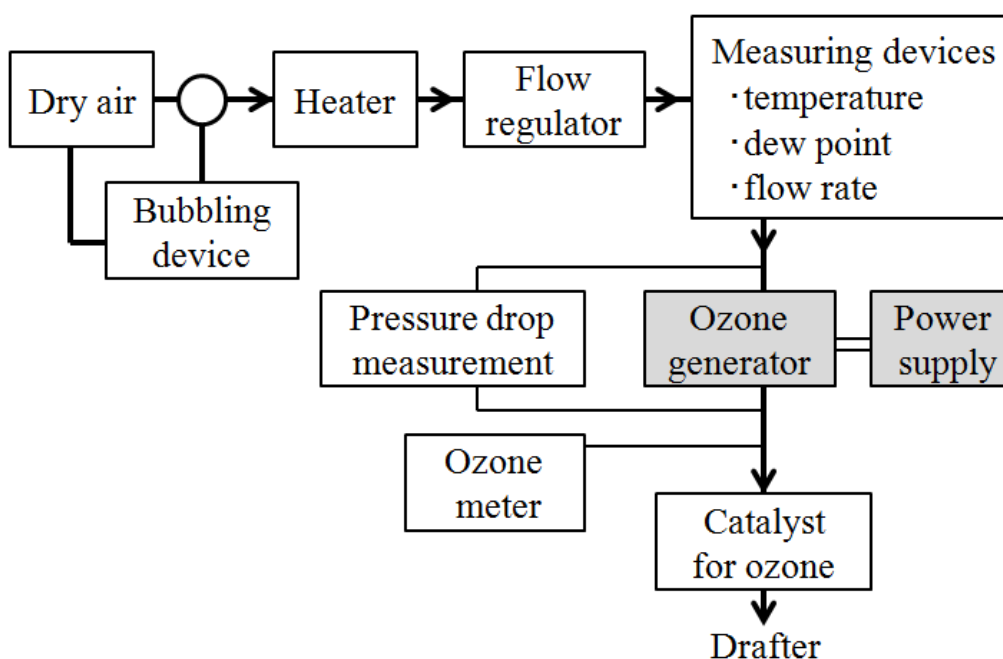


Fig.5.9 Schematic diagram of the measuring examination of quantity of generated ozone

#### 5.3.2 試験結果および考察

表 5.1 に各試験条件を、図 5.10～図 5.13 に試験結果を示す。図 5.10 は流量の影響を、図 5.11 は気体温度の影響を、図 5.12 は湿度の影響を露点として示しており、いずれも横軸に電源出力、縦軸にオゾン発生量をとっている。また、5.2 節で掲げた目標値に相当するオゾン発生量 (1.28 g/h) を図中点線で示している。なお、流量 L/min の記載は 0 °C, 1 atm 時と

している。図 5.13 にはオゾン発生器の圧力損失について、流量を変化させて測定した結果を示す。

Table.5.1 Measurement conditions in each examination

Figure number	Flow rate [L/min]	Temperature [°C]	Dew point [°C]
Fig. 5.10	100,200,300	40	20
Fig. 5.11	200	30,40,50,60	20
Fig. 5.12	200	40	-10,0,10,20
Fig. 5.13	200	30	20

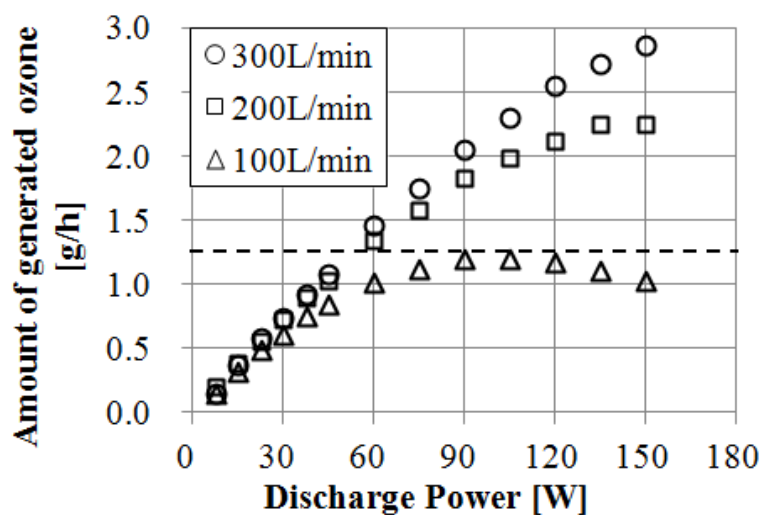


Fig.5.10 Influence of flow rate to amount of generated ozone

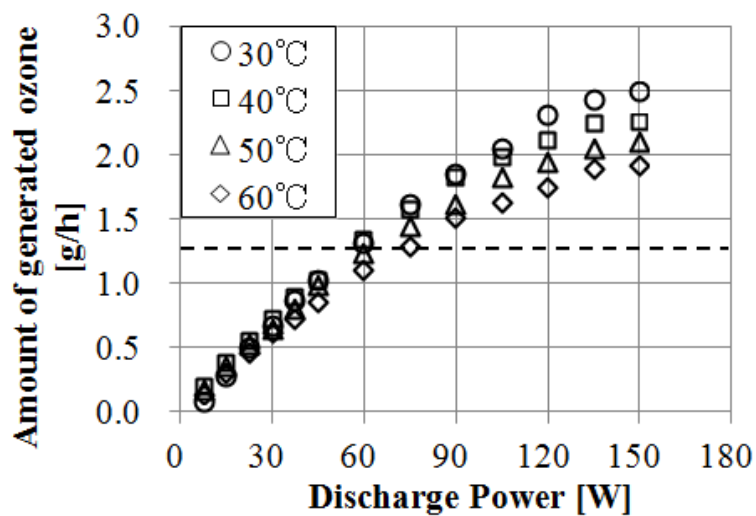


Fig. 5.11 Influence of flow temperature to amount of generated ozone

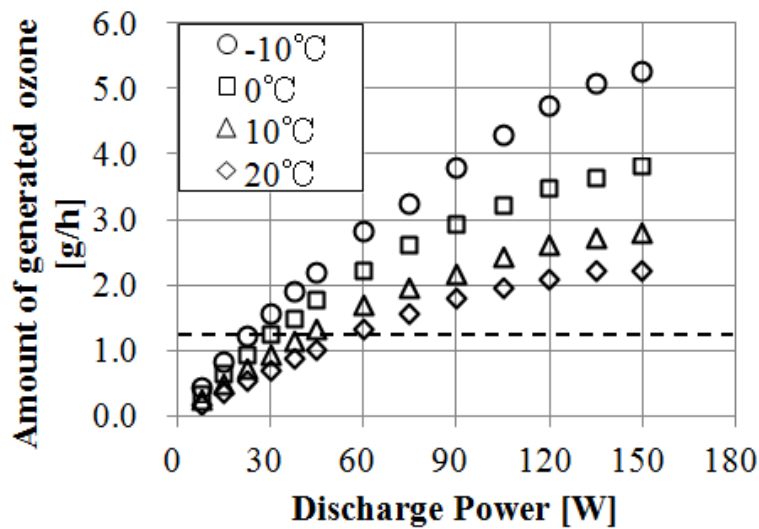


Fig. 5.12 Influence of flow dew point to amount of generated ozone

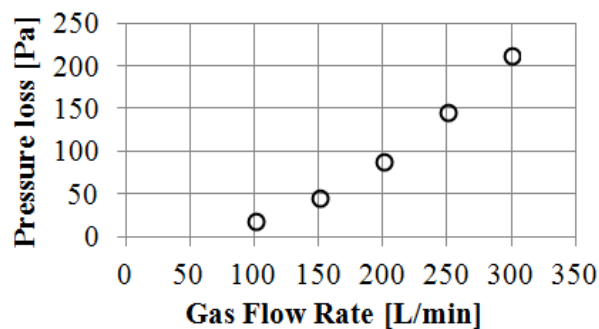


Fig. 5.13 Influence of dew point to ozone concentration

図 5.10 の結果から、各流量において電源出力 30 W 以下の領域ではオゾン発生量に大きな差はなく電源出力に対してほぼ比例して増加するのに対し、30 W 以上の領域では流量が小さいほど低電力でオゾン発生量が飽和する傾向が確認できる。そのため、300 L/min および 200 L/min では 60 W 付近で目標値に到達しているが 100 L/min では到達せず、さらに 100 W 以降では電源出力を上げるほどオゾン発生量が低下している。低下した原因はパネル電極の温度上昇によるものと考えられる。パネル電極では放電による発熱を強制対流により冷却している状態であるため、低流量ではパネル温度が高くなることで放電部の気体の温度が上昇したものと推測する。温度が高いほどオゾンの分解反応は活発になるため低流量時ではオゾン発生量が低下したと考えられる。以上の結果から、効率良くオゾンを発生させるためには、パネル電極温度を低く抑える必要があり、オゾン発生器の積極的な冷却構造が効果的であると予想される。

気体温度の依存性を示す図 5.11 の結果は、図 5.10 の結果と同様の傾向を示しており、電

源出力が高い領域で明確な差が確認出来る。しかし、気体温度 30～60℃ では流量 100～300 L/min の結果ほどオゾン発生量に大きな差は見られない。いずれもオゾン発生環境の温度が影響しているとすると、本結果は低流量時の試験ではより大きな温度上昇が起きていたことを意味する。また、低電力域において各気体温度下でのオゾン発生量がほぼ等しいことから、パネル電極が発熱しなければ気体温度 30～60℃ におけるオゾン発生量に大きな差はないことが示唆された。

露点の依存性を示す図 5.12 の結果からは露点が高い、すなわち湿度が高いほどオゾン発生量が低下していることが分かる。しかし、図 5.10 および図 5.11 に示した結果と異なり、低電力領域でも差が生じている。原因として、放電エネルギーの一部が気体中の水分に吸収される点や、水分の存在によりオゾン分解が活発になる点が考えられる。目標値 1.28 g/h に到達するための電力で見ると、露点 20℃ の場合と-10℃ の場合では必要な電源出力は倍以上変化しており、オゾン発生において露点の影響は無視できない事が分かる。

上記試験結果で示したように、オゾンの濃度はパネル電極温度および吸入空気の湿度に大きく影響を受ける。そのため、所定のオゾンを効率良く燃焼室に供給するためには、パネル電極の温度管理および、吸入する空気の状態を把握しておくことが重要である。

一方、図 5.13 の結果はオゾン発生器の圧力損失を示している。試験を実施した流量 300 L/min 以下の領域に関して、圧力損失は最大 200 Pa 程度であることが確認できる。流量 300 L/min、電源出力 20 W の条件で使用することを想定すれば、圧力損失によるエネルギー損失は電源の消費電力の 5%程度であり、エネルギー効率の観点からは影響が小さいものと考えることができる。

以上の結果をもって、製作したオゾナイザは HCCI 燃焼の改善に十分な効果があると判断し、燃焼試験にて実機評価を行う。

## 5.4 HCCI 燃焼へのオゾナイザ動作効果検証

### 5.4.1 実験概要

本実験で用いた単気筒エンジンの諸元および実験条件を表 5.2 に、実験系の概略図を図 5.14 に示す。単気筒エンジンはエンジンダイナモで回転数一定で運転し、吸排気双方に設けた可変動弁機構で負のバルブオーバーラップ(NVO)を最大で 120 [deg.CA]に設定することで HCCI 燃焼を実現した。また、低負荷域でのオゾンの効果確認のため、本供試エンジンで安定した燃焼が可能な理論空燃比とした。

オゾナイザは濃度測定の都合で燃焼室から約 850 mm 上流の吸気流路に装着しており、オゾナイザから燃焼室までに 1.5 L 程度の容積が存在する。オゾン濃度測定には紫外線式オゾンガス濃度計 OZM-5000G を用いた。パネル電極への電力投入時期(オゾン発生時期)は、パネル電極表面付近の吸気流速が高くなる吸気開弁時期に合わせるよう、エンジンのサイクルと同期させた。吸入空気の性状は制御しなかったが、概ね吸入空気温は 25℃、露点は 15℃(相対湿度 54%)であった。



Table 5.2 Engine specification and examination conditions

Engine specification	
Engine type	4-Stroke Single cylinder
Displacement	500 [cm <sup>3</sup> ]
Bore×Stroke	86×86 [mm]
Compression ratio	15.8
Fuel system	Direct injection
Examination conditions	
Engine speed	1200 [rpm]
IMEP	300 [kPa]
A/F	14.7
Negative Valve Overlap (NVO)	Max. 120 [deg. CA]
Fuel	Regular Gasoline
Coolant Temperature	90 [°C]

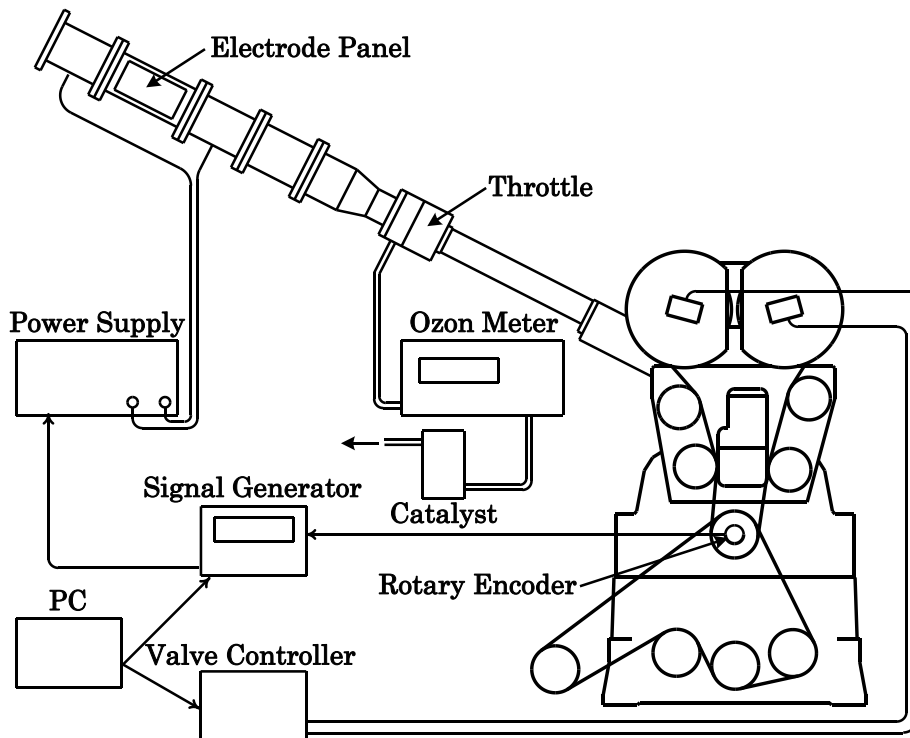


Fig. 5.14 Schematic of HCCI engine examination

#### 5.4.2 オゾナイザ STEP 動作の HCCI 燃焼への影響

スロットル上流に装着したオゾナイザの出力ごとに計測された筒内圧力発生パターンを図 5.15 に示す。凡例の括弧内数値はオゾナイザ出力時の吸気オゾン濃度を示す。

オゾナイザ出力を 5.0% (投入電力 7.5 W) から 20.0% (同 30.0 W) まで変化させ、出力の増加に伴いより自着火時期が進角し圧力上昇速度や最高圧力が上昇する傾向が認められた。

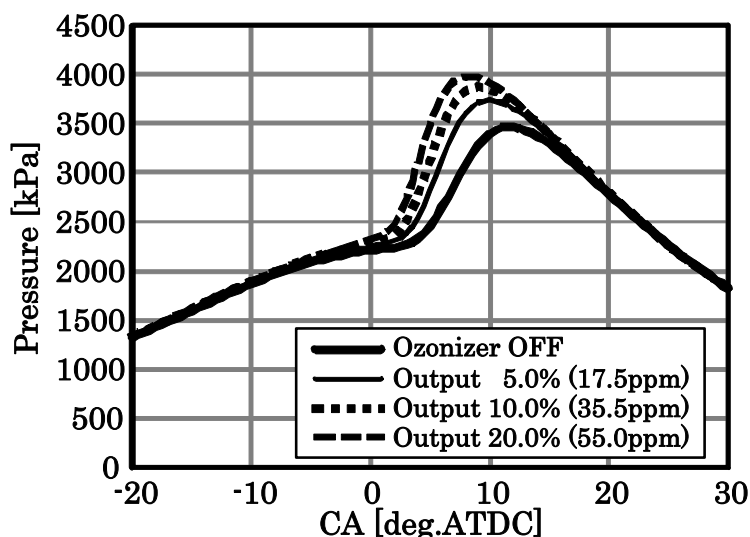
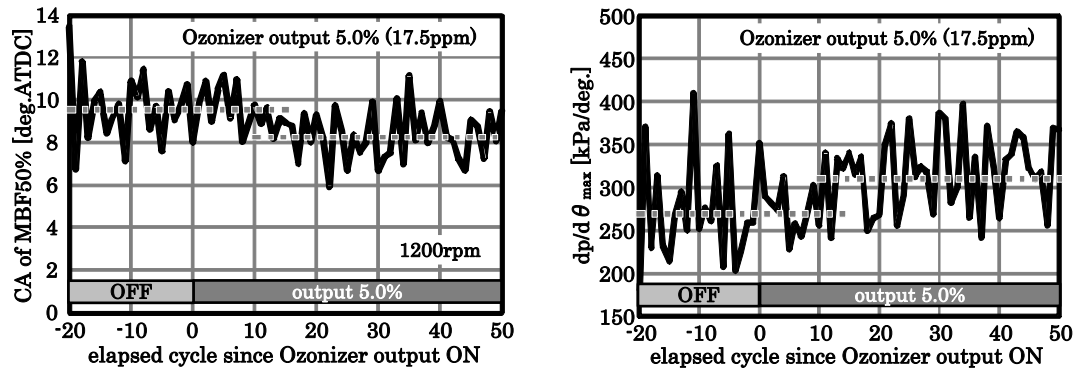


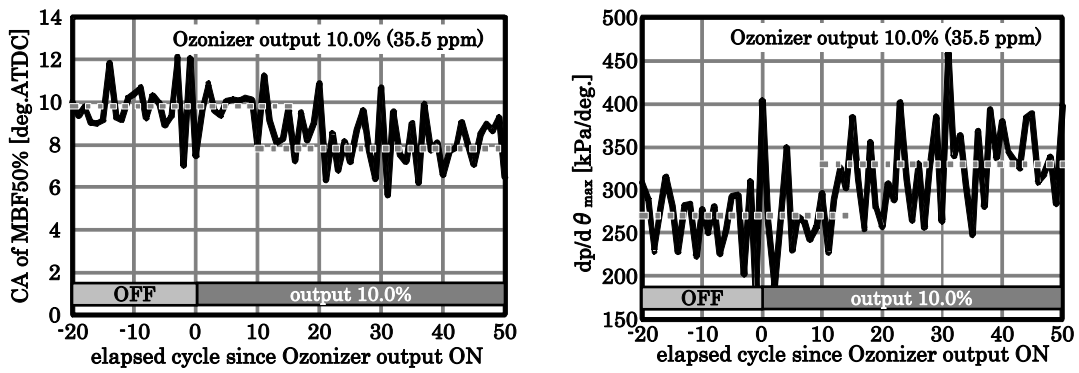
Fig. 5.15 Effect of ozonizer for in-cylinder pressure

図 5.16 に一定燃焼量 (IMEP = 300 kPa) で HCCI 燃焼を継続中にオゾナイザを OFF から出力 5.0% (投入電力 7.5 W), 10.0%(同 15 W), 20.0%(同 30.0 W)に切り替えた場合の燃焼重心位置と最大圧力上昇率の変化挙動を示す。

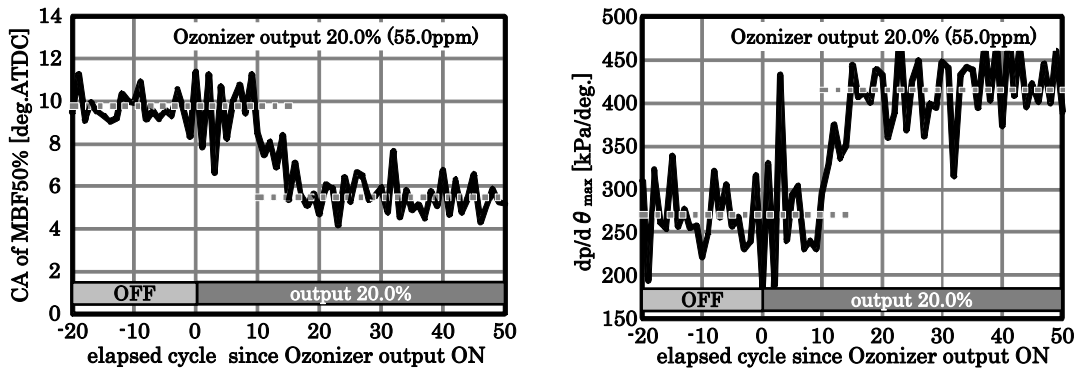
横軸 0 で示すサイクルでオゾナイザにいずれの電力を投入した場合でも約 10 サイクル後から燃焼重心位置が進角し最大圧力上昇率(燃焼速度)が上昇した。また上記の傾向は出力増大に伴って拡大した。今回の運転条件ではオゾナイザ-燃焼室間の容積は 1 サイクル当たりの吸入空気量の約 10 倍に相当する。したがって、約 10 サイクル後から各挙動変化が得られているのはオゾナイザの配置箇所による影響と判断でき、パネル電極位置を燃焼室に近接させることでより高い応答性で燃焼を制御できると考えられる。



(a) Ozoniser output 5.0%



(b) Ozonizer output 10.0%



(c) Ozonizer output 20.0%

Fig. 5.16 Effects of ozonizer for combustion characteristics

#### 5.4.3 HCCI 過渡燃焼へのオゾンナイザ効果検証

実車のエンジンは運転中ほぼ常に回転数や負荷が変化する。負のバルブオーバーラップ (Negative Valve Overlap : NVO) を設けた HCCI 燃焼は筒内に残留させた燃焼ガスの温度と量のバランスで次サイクルの燃焼挙動に大きな影響が生じる。例えば NVO 制御の遅れなどにより次サイクルで必要な温度や量が確保できなければ自着火時期の遅角化に伴う燃焼悪化や場合によっては失火が生じる。吸気系に装着したオゾンナイザを用いて吸気にオゾンを含

加することで自着火時期の進角化と燃焼速度の上昇が認められたことから、単気筒エンジンで回転数と負荷が変化する場合を想定した過渡の HCCI 燃焼制御安定化へのオゾナイザの効果を確認した。

図 5.17 は回転数が 1200 rpm で IMEP が 270 kPa の運転状態から、回転数が 1500 rpm で IMEP が 300 kPa に変化する想定で、スロットル開度、燃料噴射量、回転数、NVO を横軸 0 のサイクルから変更した際に、オゾナイザに電力を投入しない(OFF)場合と、横軸 0 のサイクルから出力 10.0%の電力投入した場合の IMEP の変化パターンを示す。

オゾナイザに出力 10.0%の電力を投入した場合は円滑に IMEP が目的値に上昇したが、電力を投入しない場合は失火が確認された。なお、オゾナイザ-燃焼室間容積による時間遅れが発生するため、電力を投入したか否かによらず 10 サイクル目までは両者同様の IMEP の変動が確認されている。先の知見と同様に、パネル電極を燃焼室に近接させることでより円滑な過渡の燃焼制御が得られると考えられる。

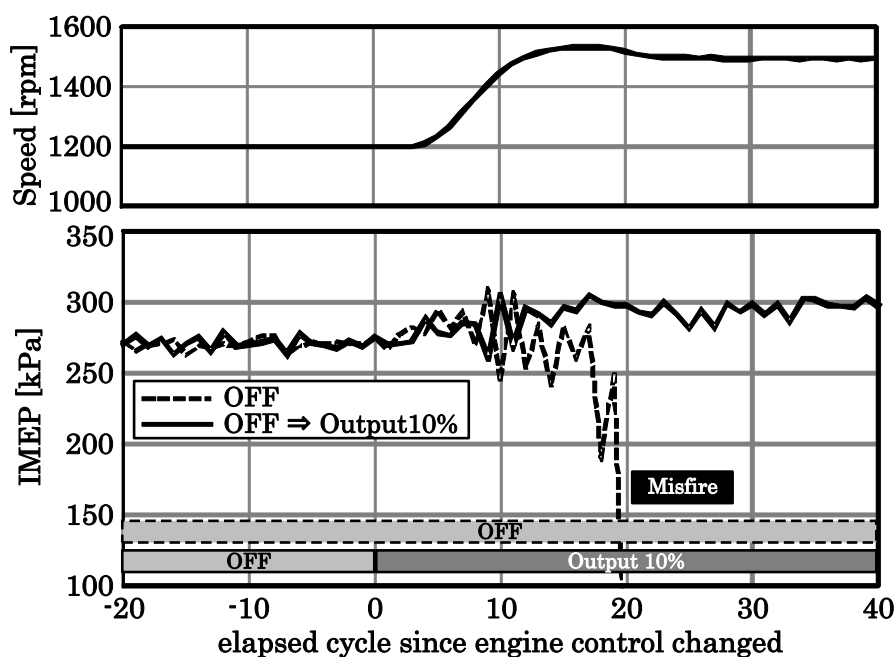


Fig. 5.17 transient control with and without ozonizer

## 5.5 結論

吸気管への装着が可能なオゾナイザを製作し、オゾン発生量測定試験および HCCI 燃焼実験を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 温度 60 °C、露点 20 °C、流量 200 L/min の空気に対して、消費電力 60 W でオゾン濃度 50 ppm を発生可能な車載用のオゾナイザを製作した。
- (2) 効率良くオゾンを発生させるためには発生器の電極温度を低く維持する必要がある。

- (3) オゾン発生量は温度および湿度に影響を受けるため、発生量を精度よく制御するには吸入空気の温度および湿度の把握が重要である。
- (4) 吸気系に装着したオゾナイザで生成されたオゾンが燃焼室に到達したと考えられるサイクルから自着火時期の進角化と燃焼速度の向上が確認された。
- (5) 過渡運転状態を模擬した HCCI 燃焼制御に対してオゾナイザを用いることで失火を抑える効果が確認され燃焼制御方法としてのオゾナイザの可能性を示した。

## 第6章 結論

地球温暖化の問題が深刻化しており、あらゆる産業分野において二酸化炭素の排出量削減が求められている。当然、自動車業界も例外ではなく、極めて重要なテーマと位置付けられる。電気自動車の普及には少なくとも十数年を要すると予想されており、当面はハイブリッド自動車を含む内燃機関搭載の自動車が主流となる。したがって、地球温暖化の抑制に向けて内燃機関の燃費を改善することは依然として社会的な意義があり、継続した研究開発が求められる。

火花点火機関の燃費を改善する希薄燃焼を実現する方法として、燃焼室内を高流動化する方法と HCCI 燃焼させる方法が提案されている。前者の高流動化する方法に関しては国家プロジェクト SIP にて熱効率 50%が実証され、それに至る道筋が示された。一方、高流動および希薄燃焼においては、現行の点火方法では着火が難しいことから多量の点火コイルを連結させて大電流を流す方法が用いられている。しかしながら、電極消耗が激しく点火装置も巨大化するため実用的とは言えず、高流動下における火花放電の挙動も十分に解明されていない。高流動および希薄燃焼においても確実に着火でき、かつ、比較的簡素な構成で電極消耗の少ない点火方法が求められている。

高流動下における火花放電は下流方向への伸長および再放電を繰り返し複雑な挙動となる。現象解明に向けて様々な研究が進められているが、影響因子が多く存在することもあり十分に解明されていない。特に再放電により初期火炎核が分断され得ることを想定すると、火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性は確実な着火に対して非常に重要であるが、詳細に調査した研究例は見受けられなかった。そこで本論文の 2 章では、流速および燃焼条件を変化させた際の火花放電の挙動と混合気に与えられる放電エネルギーの関係性を明らかにし、高流動下においても確実に着火できる点火方法について考察した。高流動が発生可能な定容燃焼容器を用いて放電観察ならびに電圧および電流波形の分析を実施した結果、流速や燃焼条件は再放電の挙動を変化させ、混合気に与えられる放電エネルギーにも影響を与えることが明らかとなった。本結果から高流動下において確実に着火するためには放電雰囲気の影響を受けず一定の周期かつ一定の放電エネルギーを繰り返し投入できる点火方法が望ましいと結論付けた。

3 章では 2 章で得られた知見をもとに一定の周期かつ一定の放電エネルギーを繰り返し投入できる点火方法として多段パルス放電 (MSPD) を発生できる装置を製作した。スワール流を発生可能な単気筒エンジンをを用いて MSPD と火花放電点火の希薄条件における着火性を比較した結果、MSPD は火花放電点火よりも着火性が改善することを確認した。また、得られた可視画像より初期火炎核の形成過程を観察した結果、火花放電点火は放電伸張によって接地電極から離れた箇所と比較的長い期間混合気にエネルギーを与えることで大きな火炎核を形成するのに対し、MSPD は押し流された火炎核の上流で新たな火炎核を形成し、それらが連なることで大きな火炎を形成する様子が確認された。

多段パルス放電は単一の電極間で繰り返し放電を発生させる点火方法であったが、体積的に繰り返し放電を発生させることでさらなる着火性の改善に期待ができると考え、4章では誘電体バリア放電 (DBD) に着目した。比較的簡素な構成かつ電極消耗せずに体積的な放電を実現する方法である。しかしながら、DBD による点火を試みた先行例は非常に少なく希薄燃焼時の点火特性を評価した報告はなされていない。また可視化により着火メカニズムを議論した例もなく、DBD 点火においては基礎的な特性や現象はほとんど明らかにされていない。そこで、製作した DBD 装置および定容燃焼容器を用いて圧力および空気過剰率を変更した点火実験を実施した。またシュリーレン画像により誘電体バリア放電による着火メカニズムについて考察した。結果、本実験から下記の知見を得た。

- (1) 誘電体バリア放電による点火は、ある一定以上の圧力で着火に至る特性を有する。その要因は圧力上昇により放電路 1 本あたりの放電エネルギー密度が上昇するためと考えられる。
- (2) 混合気が希薄化するほど、上記の点火可能となる圧力のしきい値は高くなる。
- (3) 体積的な着火が可能であることをシュリーレン撮影により確認した。沿面放電により誘電体表面を覆うような初期火炎核が形成され、気中放電を起点として初期火炎核が成長する着火メカニズムであると考えられる。
- (4) 誘電体バリア放電による点火によって形成された火炎は複雑なしわを有することが判明し燃焼速度の向上に期待できる。
- (5) 電極への冷却損失がより小さい電極構造とすることで点火の希薄限界が向上すると考えられる。

5章では希薄燃焼のもう一方の実現手段である HCCI 燃焼に対して、点火とは異なる DBD 活用方法としての研究を行った。HCCI 燃焼では運転可能範囲が空気比や吸気温度によって限定されることが課題であり、燃焼室にオゾンを提供することにより希薄限界の拡大および必要な吸気温度の低減が報告されている。しかしながら、実際のエンジンへの適用を想定したオゾン発生方法の議論や吸気温度および湿度がオゾン発生量に与える影響の評価はなされておらず、実用化の検討には踏み込まれていない。また運転領域が限定されるだけでなく、負荷が急変化した際に生じる燃焼の不安定化も課題である。そこで吸気管に装着可能なインライン型のオゾナイザを製作し、オゾン発生量測定試験を実施することで吸入空気の温度および湿度がオゾン発生量に与える影響を明らかにした。また製作したオゾナイザを用いて HCCI 燃焼の促進効果を確認した。さらに HCCI 過渡燃焼実験により通常では失火する運転条件におけるオゾナイザの有効性を確認し、HCCI 燃焼における燃焼制御方法としての可能性を示した。

以上、本論文でまとめた研究結果から、希薄燃焼の着火性改善に対して DBD は従来の方法では見られない多くの魅力的な特徴を有することを示した。DBD を点火方法として適用する場合は冷却損失がより小さい電極形状の研究や、高流動下における初期火炎核の形成過程の研究が重要であると考えられる。また DBD の電源条件が点火特性に与える影響につ

いても明らかにする必要がある。これらの研究が進むことで、DBD 点火は希薄燃焼に対してこれまでになく新たな点火方法となり得る。一方、DBD を HCCI 燃焼の制御方法として適用する場合は、吸入空気だけではなくオゾン発生器の温度がオゾン発生量に与える影響を明らかにすることで、より精度の高い燃焼制御方法として確立すると考える。

本研究で示した DBD の新たな可能性はさらなる燃費改善に対して非常に将来有望である。本分野に関する研究が発展することで自動車の燃費改善、ひいては地球温暖化の抑制に貢献できる。



## 付録 A 点火装置の歴史

内燃機関の点火装置は関連技術の発展とともにこれまでに大きく進化を遂げてきた。1800年代ではパイロットバーナーを用いた点火装置、1900年前後では永久磁石による電磁誘導を利用した点火装置が用いられてきた。その後、自動車の普及とともに広く実用されたのが機械式スイッチとディストリビュータを組み合わせた点火装置である。概略図を図7.1に示す。バッテリーから得られた電圧を点火コイルで高電圧に昇圧し、ディストリビュータを用いて各気筒の点火プラグに分配するシステムである。ディストリビュータ内部ではカムと同期したローターによって分配先が決定され、高い耐電圧を有するプラグコードにより所定の点火プラグへ高電圧を供給する。また、点火コイルとアースの間にはカムと同期した機械式スイッチ（接点）が設けられており、バッテリーからの電流を高速に遮断することで1次電圧を瞬間的に高めている。電流遮断により高まった電圧を点火コイルの巻き線比に応じた昇圧比で上げることで高電圧を発生させる。ここで、点火コイルの1次側に取り付けられるコンデンサは、電流をスイッチングする際に発生するスパークを抑制し機械式スイッチの消耗を抑える役割を担っている。

上記構成による点火装置が使用されるなかで、トランジスタの発明により、機械式スイッチが電気式スイッチへと段階的に置き換わっていった。まずは1次側の機械式スイッチのみを電気式スイッチに置き換えたセミトランジスタ方式が普及した後、徐々に機械式スイッチを完全に排除したフルトランジスタ方式が主流となっていった。この時点ではまだディストリビュータは用いられているが、電流のスイッチ機能自体は外部の半導体が担っており、電流が流れないタイミングで接続先を切り替える役割のみを担う。電流を流しながら切り替える必要がなくなったため、切り替え時に発生していたスパークが抑制され、ディストリビュータのメンテナンスの頻度は従来よりも格段に長くなった。

以上のような進化を経て、現在はコイルの小型化によりディストリビュータを使用しないダイレクトイグニッション方式が主流となっている。1つの点火プラグに対して直近に1つの点火コイルをそれぞれ設ける構成である。各点火時期を独立して電子制御できることがディストリビュータとの大きな違いであり、ダイレクトイグニッション方式は点火の制御性を大きく向上させた。また、プラグコードを使用しないため高電圧線を引き回す必要がなく、送電ロスの低減や電気ノイズの抑制にも貢献した。

また、一部のエンジンで用いられている容量放電式点火装置についても本付録で説明する。容量放電式点火装置の代表的な回路図を図7.2に示す。回路の動作としては、まずDC-DCコンバータでバッテリー電圧を昇圧し、1次側に配置したコンデンサに充電する。続いてサイリスタにトリガパルスが入力されることで点火コイルの1次側に電流が流れ、巻き数比に応じた高電圧が2次側に発生する。一度の放電で1次側コンデンサの容量に応じた正極および負極の電圧が一回ずつ発生し、合計で0.1ms~0.2msの放電時間をもつ。容量放電式点火装置の特徴としてはピーク電圧を高くしやすい一方、投入エネルギーを高くし

づらく、放電時間も短くなる。そのため、希薄燃焼には適さず、一部の二輪車や小型汎用エンジンに用いられている。

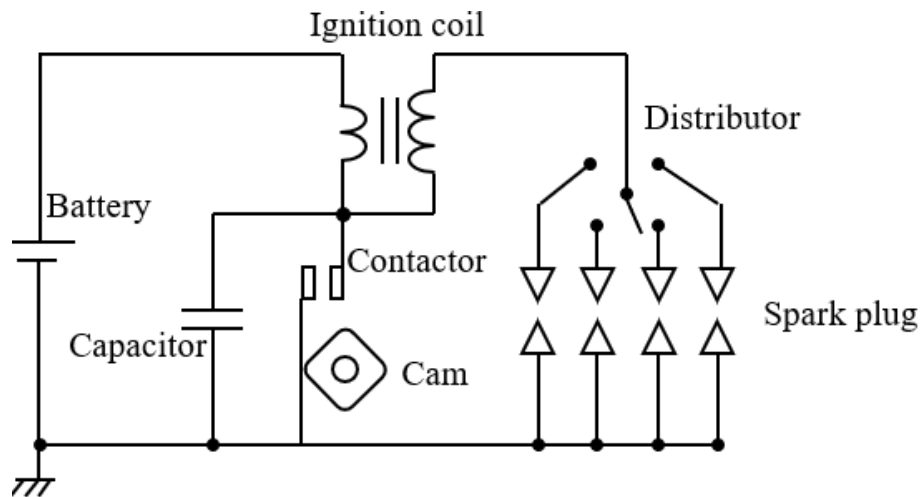


Fig.7.1 Circuit diagram of igniter using distributor

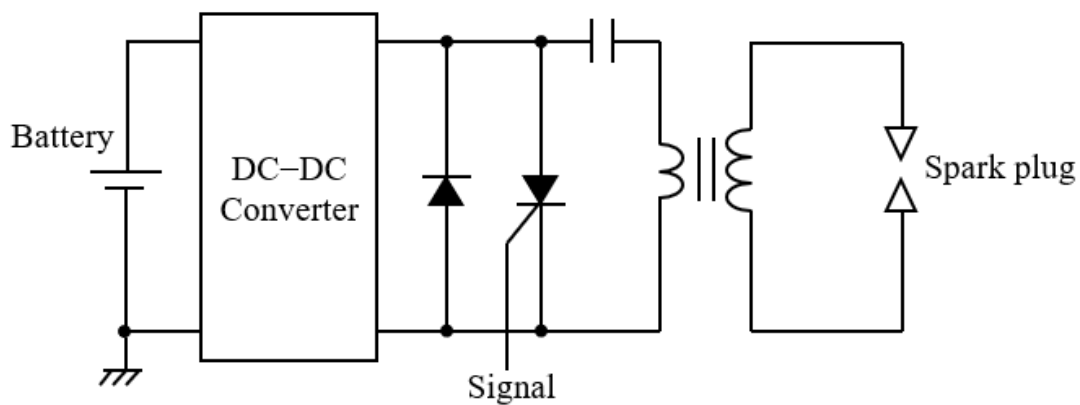


Fig.7.2 Circuit diagram of capacity discharge igniter

## 付録 B 点火プラグの構造

次に点火プラグについて述べる。点火プラグは点火コイルからの高電圧を受け、エンジンの燃焼室内で火花放電を発生させる役割を担う。点火プラグの断面図を図 7.3 に示すが<sup>(17)</sup>、本説明では点火プラグがエンジンの直上から鉛直方向下向きに装着されるケースを前提に記述を進めていく。

点火プラグでは、上部に配置される端子部と点火コイルとが接続され、点火プラグの中心を通過する中軸や充填粉末などを介して中心電極に高電圧が印加される。中心電極と対になる接地電極は一般的に L 字型の形状をしており、両電極間で火花放電を発生させて混合気を点火する。端子部から中心電極にかけては高電圧となるため、周囲をアルミナの絶縁碍子で絶縁した上で金属製のハウジングで固定している。ハウジングにはエンジンに取り付けるためのネジが切られており、先端に接地電極が溶接される。すなわち、点火プラグを電気回路の負荷と見た場合、ハウジングおよびネジと導通する金属部分が全て基準電位となる。一方で、上述した構造においては、端子部分とハウジングの上端の間においても電極間と同等の電位差が生じるため、放電するリスクがある。端子部分およびハウジング上端の間で発生する放電を抑制するため、ハウジングがない部分の絶縁碍子表面には、沿面距離を延ばして絶縁耐圧を上げるための凹凸形状が設けられている。また、内部の充填粉末は機密性を保つ役割を担っており、中心電極と絶縁碍子の間から燃焼室内部の圧縮混合気が漏れないようになっている。同時に、充填粉末には放電時の電気ノイズを低減するために  $k\Omega$  レベルの電気抵抗値が付与される。

他にも、点火プラグの重要な性能としては熱特性が挙げられる。エンジン稼働中の点火プラグ電極部には適正な温度範囲があり、始動時などの過渡的な状況を除いて基本的には適正温度内に保つ必要がある。プラグ電極部の温度は燃焼によって受ける熱量とエンジン筐体などへの放熱量のバランスで決まるが、後者の放熱量は点火プラグの構造や材質によりある程度調整することが可能で、放熱量の設計指標を熱価と呼ぶ。熱価が高いほど放熱量が大きく、高出力のエンジンで採用される。点火プラグの適正温度としては  $500^{\circ}\text{C}\sim 950^{\circ}\text{C}$  程度が目安とされている。下限値は自己清浄温度と呼ばれており、絶縁体の表面に付着したカーボンが燃焼で焼き切れる温度である。下限値を下回った状態でエンジンを稼働させると、絶縁体表面に付着したカーボンが次第に堆積していき導電路を形成する。結果、高電圧が発生せず、電極間で放電が発生しなくなる。特に直噴ガソリンエンジンでは大きな課題となることが知られている<sup>(83)</sup>。一方で、上限値である  $950^{\circ}\text{C}$  程度を超えた場合には電極が熱源となって着火するプレイグニッションが発生する<sup>(84)</sup>。プレイグニッションの発生により、意図しない時期で燃焼が開始されるだけでなく、点火プラグの電極部が損傷する懸念が生じる。いずれにしても、点火プラグの適正温度を外れた場合にはエンジンの動作に致命的な影響を与え得ることから、エンジンに適した熱価を選定することが非常に重要である。

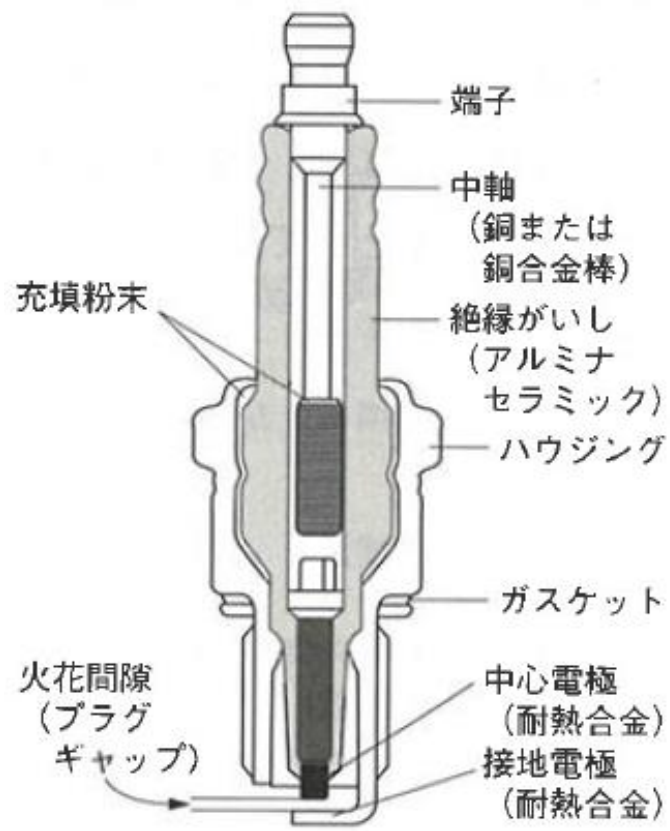


Fig.7.3 Schematic diagram of spark plug<sup>(17)</sup>

## 付録 C 最適点火時期

本付録では点火時期について説明する。点火方式や点火エネルギーが同じであっても、混合気を点火する時期によってエンジンの図示熱効率は大きく変わる。理論的には、上死点 (Top Dead Center :TDC) でピストン運動に対して十分に短い時間で燃焼が完了することが図示熱効率の観点で有利であるが、実際には燃焼の開始から終了までに燃焼室容積が変わることがほとんどである。よって、図示熱効率を高めるためには上死点よりも早い時期 (進角側) で点火を行う必要があるが、燃焼に要する時間に応じて最適な点火時期が存在する。図 7.4 に示す  $p - V$  線図を用いて具体的に説明する。理想的なオットーサイクルでは容積が最小となる時期において圧力が垂直に上がるが(図 7.4 [2]→[3])、実際は容積が変化しながら圧力が上昇する。そのため断熱圧縮行程(図 7.4 [1]→[2])で点火を行うが、点火時期によって閉曲線の面積が変わるため点火時期に応じて正味の仕事量に変化する。最も高い仕事量が得られるときの点火時期を最適点火時期 (Minimum Advance for Best Torque :MBT) と呼ぶ。図 7.5 に横軸を点火時期、縦軸をトルクとした時の両者の関係を示す。点火時期を上死点から進角すると得られるトルクは上昇していき、ある時期よりも進角すると逆にトルクは下がっていく。しかしながら、点火時期を TDC から進角していくと MBT に到達する前にノッキングが発生する。ノッキングとは高周波振動を伴う異常燃焼であり、代表的には、火炎伝播の最中に未燃領域で自着火が起きることで発生する。ノッキングが発生するとエンジンが損傷する恐れがあるため、点火時期はノッキングが起きないように設定する必要がある。実用的には高周波振動を検知するノックセンサを装着し、遅角側から MBT に少しずつ近づけていきノッキングが発生し始めたら点火時期を遅角する制御を行っている。ノックセンサを用いた制御により、ノッキングが発生する直前まで進角することができ、図示熱効率を可能な限り高めている。

また、点火装置の制御に関しては、点火信号が ON を維持する時間で投入エネルギーを調整でき、点火信号が OFF になる時期に点火プラグに高電圧が発生する。そのため、例えば点火時期を固定して投入エネルギーを増加したい場合には、OFF の時期を固定し、ON とする時期を早めていく必要がある。点火コイルは各気筒に配置されるため、各気筒の点火時期と投入エネルギーを独立して制御できる。

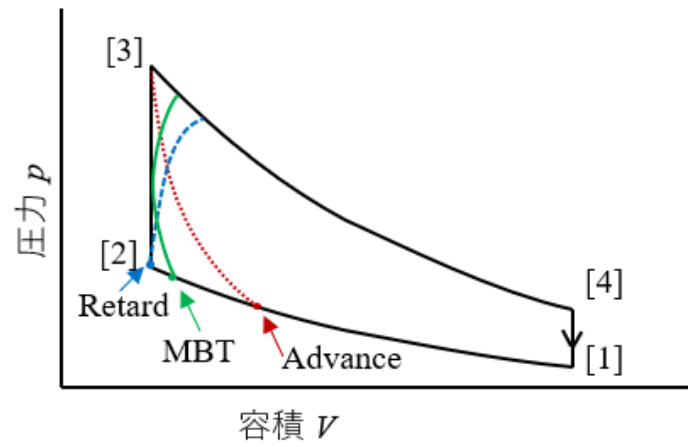


Fig.7.4 Influence of ignition timing on  $p - V$  diagram

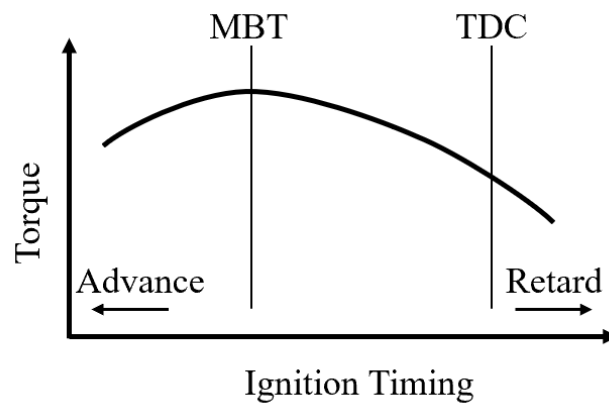


Fig.7.5 Relationship between ignition timing and torque

## 参考文献

- (1) World Meteorological organization  
<https://public.wmo.int/fr> (2022-01-20 accessed)
- (2) UNFCCC  
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (2022-01-20 accessed)
- (3) 環境省脱炭素ポータル  
[https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/) (2022-01-20 accessed)
- (4) 気象庁 HP  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki\\_ondanka/p04.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p04.html) (2022-01-20 accessed)
- (5) 全国地球温暖化防止活動推進センターHP  
<https://www.jccca.org/download/13335> (2022-01-20 accessed)
- (6) 三井物産戦略研究所 世界の自動車燃費規制の進展と電動化の展望  
<https://www.mof.go.jp/pri/research/seminar/fy2017/lm20180315.pdf> (2022-01-20 accessed)
- (7) 日本自動車工業会  
[https://www.jama.or.jp/eco/earth/earth\\_02\\_g08.html](https://www.jama.or.jp/eco/earth/earth_02_g08.html) (2022-01-20 accessed)
- (8) 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的燃焼技術」  
<https://www.jst.go.jp/sip/k01.html> (2022-01-20 accessed)
- (9) 飯田訓正ら：SIP「革新的燃焼技術」ガソリン燃焼チームの研究成果—高効率ガソリンエンジンのためのスーパーリーンバーン研究開発—，日本燃焼学会誌，第61巻197号(2019)
- (10) 畑村耕一：自動車エンジン技術がわかる本，ナツメ社，p.201-211 (2009)
- (11) 伊藤直也ら：ノック振動を伴う HCCI 燃焼の自着火挙動及び周波数特性，日本燃焼学会誌，第57巻180号 (2015)
- (12) Taisuke Shiraishi, : “Possibility of the new Ignition System using the low Temperature Plasma having dual Functions of strengthening Ignition for SI Combustion and promoting and controlling Autoignition of HCCI Combustion”, Ignition Systems for Gasoline Engines 1st Conference, No.6 (2012)
- (13) 高橋 栄一，小島 宏一，山口 誠也：パルス状 DBD 印加による着火制御効果，第24回内燃機関シンポジウム講演論文集，講演番号24(2013)
- (14) 高橋 巧朋，清末 涼，村上 康，山下 洋幸：オゾン添加によるガソリン HCCI の低温燃焼特性，第23回内燃機関シンポジウム講演論文集，講演番号 B1-13(2012)

- (15) Ali Mohammadi, Hiroshi Kawanabe, Takuji, Ishiyama, Masahiro Shioji, : "Study on Combustion Control in Natural-Gas PCCI Engines with Ozone Addition into Intakes Gas", SAE 2006-01-0419 (2006)
- (16) Eoin W.Gray, Julian R. Pharney : "Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs", Journal of Applied Physics, Vol.45, No.2 (1974)
- (17) H. Osamura : "Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes", SAE1999-01-0796 (1999)
- (18) 河野道方ら : 流動混合気の火花点火における要因解析, 日本機械学会論文集 B 編, 51(461), 248-256 (1985)
- (19) N. Pashley, et al., : "Ignition System Measurement Techniques and Correlations for Breakdown and Arc Voltages and Currents", SAE 2000-01-0245 (2000)
- (20) M. Lee, et al., : "Voltage, and Energy Deposition Characteristics of Spark Ignition Systems", SAE 2005-01-0231 (2005)
- (21) J. Kim and R. Anderson, : "Spark Anemometry of Bulk Gas Velocity at the Plug Gap of a Firing Engine", SAE952459 (1995)
- (22) 佐山勝悟ら : 高流速条件での放電経路の短縮化現象のモデル化 (第1報), 自動車技術会論文集, Vol.49 No.4 (2018)
- (23) N. Kawahara, et al., : "Spark discharge ignition process in a spark-ignition engine using a time series of spectra measurements", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.36 No3 (2017)
- (24) 西尾典晃, 青木文明, 石田翔平, 土井香 : カロリーメータ法による放電火花の熱エネルギー解析, 自動車技術会論文集, Vol.47 No.3 (2016)
- (25) T. Shiraishi, et al., : "The Effects of Ignition Environment and Discharge Waveform Characteristics on Spark Channel Formation and Relationship between the Discharge Parameters and the EGR Combustion Limit", SAE2015- 01-1895 (2015)
- (26) Naoto Hayashi, Akimitsu Sugiura, and Yuya Abe : "Development of ignition Technology for Dilute Combustion Engines", SAE 2017-01-0676 (2017)
- (27) 河原伸幸, 富田栄二 : 火花点火機関における希薄燃焼時の火花放電・火炎伝播の同時可視化, 自動車技術会 2016 年春季大会講演予稿集, 20165189, p1011-1014 (2016)
- (28) Schneider, A., Leick, P., Hettinger, A., Rottengruber, H. : "Experimental studies on spark stability in an optial combustion vessel under flowing conditions", Internationaler Motorenkongress 2016, Proceedings (2016)
- (29) Michael Günther et al., : "Optimizing the Spark Position While Allowing for the Effect of In-Cylinder Flow", Ignition Systems for Gasoline Engines 1st Conference, No.8 (2012)



- (30) Suzuki, K., Uehara, K., Mrase, E., Nogawa, S., : “Study of Ignitability in Strong Flow Field”, Ignition Systems for Gasoline Engines (2017)
- (31) T.Shichida, et al., : “Numerical Simulation for Ignitability of Spark Plug using Detailed Chemical Kinetics”, SAE 2014-01-1234 (2014)
- (32) 堀司 : 火花点火機関における放電経路伸長と再放電のモデリング, 自動車技術会論文集, Vol.48 No.3 (2017)
- (33) 磯島和也 : 点火プラグの気流下における誘導放電, 第 26 回内燃機関シンポジウム講演論文集, 20158052, p1-5 (2015)
- (34) 芹澤毅ら : 高周波印加型点火システムの燃焼特性に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷り集 No.96-11 (2011)
- (35) Ikeda, Y., et al., : "Research and Development of Microwave Plasma Combustion Engine (Part I: Concept of Plasma Combustion and Plasma Generation Technique)," SAE 2009-01-1050 (2009)
- (36) Ikeda, Y., et al., : "Research and Development of Microwave Plasma Combustion Engine (Part II: Engine Performance of Plasma Combustion Engine)," SAE 2009-01-1049 (2009)
- (37) Ben Wolk, et al. : "Enhancement of flame development by microwave-assisted spark ignition in constant volume combustion chamber", Combustion and Flame 160(7) (2013)
- (38) Ikeda, Y., Padala, S., Makita, M., and Nishiyama, A., : "Development of Innovative Microwave Plasma Ignition System with Compact Microwave Discharge Igniter," SAE 2015-24-2434 (2015)
- (39) Padala, S., Nagaraja, S., Ikeda, Y., and Le, M., : "Extension of Dilution Limit in Propane-Air Mixtures Using Microwave Discharge Igniter," SAE 2017-24-0148 (2017)
- (40) Dale, J.D., Oppenheim, A.K., : "Enhanced ignition for I.C.engines with premixed gases", Trans. SAE, Paper810146 (1981)
- (41) Stanislaw Szwaja, et al., : "A two-stage combustion system for burning lean gasoline mixtures in a stationary spark ignited engine", Applied Energy, 105 (2013) 271-281
- (42) 大畠英一郎, 藤山幸雄 : EGR 燃焼エンジン向け高エネルギー点火システムの検討, 自動車技術会論文集 Vol.51, No.4 (2020)
- (43) Terrence Alger, et al., : "A Continuous Discharge Ignition System for EGR Limit Extension in SI Engines ", SAE 2011-01-0661 (2011)
- (44) Ming Zheng, et al., : "High Energy Multipole Distribution Spark Ignition System", Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.6 (2016)
- (45) Mohamed H. Morsy, : "Review and recent development of laser ignition for internal combustion engines applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(2012) 4849-4875

- (46) 平等拓範ら：ジャイアントパルスマイクロレーザーによるエンジン点火の可能性, J. Plasma Fusion Res. Vol.89, No.4 (2013)
- (47) T. Taira : "Giant Micro-Photonics Toward Innovative Ignition," Laser Ignition Conference (2017)
- (48) J. Hayashi, : "Effects of Microwave-Enhanced Plasma on Laser Ignition", Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.14 (2016)
- (49) S.M. Starikovskaia, "Plasma assisted ignition and combustion", J. Phys.D Appl Phys 39 (2006)
- (50) SUN Wenting, JU Yiguang, : "Nonequilibrium Plasma-Assisted Combustion: A Review of Recent Progress", J. Plasma Fusion Res, Vol.89, No.4 (2013) 208-219
- (51) Yiguang Ju, Wenting Sun : "Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry", Energy and Combustion Science, 48 (2015)
- (52) K.Tanoue, et al., "Development of a Novel Ignition System Using Repetitive Pulse Discharges", SAE 2008-01-0468 (2008)
- (53) Jian-Bang Liu, et al., "Premixed flame ignition by transient plasma discharges", Proc, 3rd Joint Meeting U.S. Sect. Combust, Inst, pp.16-19 (2003)
- (54) Sergey V. Pancheshnyi, et al., "Ignition of Propane-Air Mixtures by a Repetitively Pulsed Nanosecond Discharge", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.45 (2006)
- (55) Hampe, C., Kubach, H., Spicher, U., Rixecker, G. et al., "Investigations of Ignition Processes Using High Frequency Ignition," SAE 2013-01-1633 (2013)
- (56) Georg Rixecker, et al., : "The High Frequency Ignition System EcoFlash", Ignition Systems for Gasoline Engines 1st Conference, No.5 (2012)
- (57) Michael Günther, : "Design Criteria for the Use of Corona Ignition Systems in Combustion Engines", Ignition Systems for Gasoline Engines 1st Conference, No.17 (2012)
- (58) Paulus Krüger, Barend Visser, : "Advanced Plasma Ignition (API): A Simple Corona and Spark Ignition System", Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.16 (2016)
- (59) John Burrows and Kristapher Mixell, : "Analytical and Experimental Optimization of the Advanced Corona Ignition System", Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.17 (2016)
- (60) Fabian Marko, et al., : "Comparative Optical and Thermodynamic Investigations of High Frequency Corona- and Spark-Ignition on a CV Natural Gas Research Engine Operated with Charge Dilution by Exhaust Gas Recirculation", Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.18 (2016)
- (61) Cherian A. Idicheria, Paul M. Najt, : "Potential of Advanced Corona Ignition System

- (ACIS) for Future Engine Applications”, Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.19 (2016)
- (62) Stephanyan, S., Hayashi, J., Laux, C.: “Large-volume excitation of air, argon, nitrogen and combustible mixtures by thermal jets produced by nanosecond spark discharges”, Plasma Sources Sci. Technol, 26 04LT01 (2017)
- (63) Sara Lovascio, Jun Hayashi, Sergey Stepanyan, Gabi D. Stancu, Christophe O. Laux : “Cumulative effect of successive nanosecond repetitively pulsed discharges on the ignition of lean mixtures”. Proceedings of the Combustion institute, Vol.37 (2019)
- (64) Taisuke Shiraishi, Tomonori Urushihara and Martin Gundersen : “A trial of ignition innovation of gasoline engine by nanosecond pulsed low temperature plasma ignition”. Journal of physics D Applied Physics 42 (2009) , 135208
- (65) 森吉泰生, 松本脩, 窪山達也, 塚本貴大, 衣沢善幸, 前嶋 秀明 : 低温プラズマによるガスエンジンの点火手法の研究. 自動車技術会2019年春季大会講演予稿集 (2019), 20195184
- (66) Xiaojinf Ren, et al., : "Solid-State Marx Generator Circuit With Inductive Booster", IEEE Transactions on Plasma Science, VOL. 49, NO. 1, (2021)
- (67) Weihua Jiang : "Review of solid-state linear transformer driver technology", Matter and Radiation at Extremes, Volume 3, Issue 4, p.159-164 (2018)
- (68) 高木浩一ら : パルスパワー発生回路の設計と実践, J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.3, p.202-215 (2011)
- (69) S.A. Darznek, G.A. Mesyats , S.N. Rukin : “Dynamics of electron-hole plasma in semiconductor opening switches for ultradense currents”, Tech. Phys.42, 1170 (1997)
- (70) 八木重典 : バリア放電の現象, バリア放電, 東京, 朝倉書店, 2012, p. 52-59
- (71) 白石 泰介, 漆原 友則 : バリア放電を応用した低温プラズマ点火の点火特性に関する基礎的研究. 自動車技術会論文集 41 巻 2 号 (2010)
- (72) Serfey A., et al., : “Ignition and Combustion Sustained by Low Temperature Plasmas and Spark Discharges: Difference in Physical Properties of Plasma and Kinetic Mechanism”, Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference (2016)
- (73) S. A. Shcherbanev, S. A. Stepanyan, N. A. Popov and S. M. Starikovskaia : “Dielectric barrier discharge for multi-point plasma-assisted ignition at high pressures”, Philos Trans A Math Phys Eng Sci (2015)
- (74) 青山雅彦ら : 点火装置の革新的技術, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan 59(1) (2005)
- (75) 朝倉哲ら : 定容容器内燃焼に及ぼすスワールの影響について, 自動車技術会学術講演会予稿集 (秋) (1979)

- (76) 城戸裕之ら：定容容器内局所予混合化成層燃焼方式の開発，第6回内燃機関合同シンポジウム講演論文集(87-1-21,22) (1987)
- (77) 大野富美男ら：直接噴射成層混合気の燃焼特性，自動車技術会論文集，No.45 (1990)
- (78) Sebastian Lorenz, et al., “Pulse Train Ignition with Passively Q-Switched Laser Spark Plugs Under Engine-like Conditions”, Ignition Systems for Gasoline Engines 3rd Conference, No.15 (2016)
- (79) L. Wayne Sieck, et al., “Chemical Kinetics Database and Predictive Schemes for Humid Air Plasma Chemistry. Part I: Positive Ion–Molecule Reactions<sup>1</sup>”, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.20, No.2 (2000)
- (80) John T. Herron and David S. Green, et al., “Chemical Kinetics Database and Predictive Schemes for Humid Air Plasma Chemistry. Part II. Neutral Species Reactions”, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.21, No.3 (2001)
- (81) Nikolay Vasilievich Ardelyan, et al., “Kinetic Model of Pulsed Discharge in Humid Air”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.41, No.12 (2013)
- (82) 長山勲：基礎エンジン工学，東京電機大学出版局，p.177-181 (2008)
- (83) 内田健児ら：透過光減衰による直噴ガソリンエンジンのプラグくすぶり性評価方法の開発，自動車技術会論文集，Vol.44 No.2 (2013)
- (84) 岩塚知宏ら：スパークプラグからの HSPI および LSPI に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.48 No.4 (2017)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の川那辺洋教授には、社会人学生という立場で暖かく研究室に迎えて頂き、丁寧かつ親身なご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

林潤准教授には日常の実験や論文などご指導を賜り、また、議論を通じて多くの知識や示唆を頂き深く感謝申し上げます。堀部直人准教授には実験のご支援や論文執筆でのご指導を賜り感謝申し上げます。

今谷勝次教授には論文の審査を頂き、様々なご助言を頂きました。感謝申し上げます。

博士課程同期の汐除さんには研究室活動にあたり、公私にわたり相談に乗って頂きました。サウラブさん、山本さん、田村さんには本研究の実験にあたり、通学の制約があるなかで親身にご協力頂きました。ご丁寧なご対応に大変助けられました。ありがとうございました。

日本大学の飯島晃良准教授、また、学生の皆さんには多段パルス放電のエンジン実験でお世話になりました。感謝申し上げます。

大阪電気通信大学の民田太一郎教授には、会社に在籍されていた際には長年にわたり丁寧なご指導を頂きました。感謝を申し上げるとともに、新天地での益々のご活躍を祈念いたします。

最後に、大学および会社の関係者をはじめ、本研究にご助力頂いた皆様に心より感謝の意を表します。

## 研究業績

### 1. 論文誌

- [1] 井上貴裕, 民田太一郎, 橋本隆, 和田昇, 中川光, 坂下友一, 和田浩司, 本田哲也 : HCCI 燃焼への適用に向けた吸気インライン型オゾナイザの開発, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.4, July (2017)
- [2] Takahiro Inoue, Taichiro Tamida, “Study of Discharge under Swirl Flow and Combustion Conditions”, SAE Technical Paper 2018-32-0006 (2018)
- [3] Yosuke Abe, Masaya Iimura, Takuma Frusho, Kotaro Takeda, Akira Iijima, Taichiro Tamida, Takahiro Inoue, “A Study on Accomplishing Lean Combustion by Multistage Pulse Discharge Ignition Using an Optically Accessible Engine”, SAE Technical Paper, 2018-32-0007 (2018)
- [4] 井上貴裕, 民田太一郎, 林潤, 川那辺洋 : 昇圧環境下における誘電体バリア放電を用いた希薄予混合気の点火特性, 自動車技術会論文集, Vol.51, No.3, May (2020)

### 2. 口頭発表

- [1] 井上貴裕, 民田太一郎, 橋本隆, 和田昇, 中川光, 坂下友一, 和田浩司, 本田哲也 : 吸気インライン型オゾナイザの開発と HCCI 燃焼への適用, 第 26 回内燃機関シンポジウム (2015)
- [2] 井上貴裕, 民田太一郎, 片岡尚紀, 稲田貴彦, 棚谷公彦 : 定容燃焼容器を用いた流動場における放電現象の解析, 第 28 回内燃機関シンポジウム (2017)
- [3] 井上貴裕 : 高流動および燃焼環境における放電現象の挙動評価, 第 210 回内燃機関懇話会 (2018)
- [4] Takahiro Inoue, Taichiro Tamida, “Study of Discharge under Swirl Flow and Combustion Conditions”, Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference (2018)
- [5] 井上貴裕, 民田太一郎, 橋本隆, 和田昇, 中川光, 坂下友一, 和田浩司, 本田哲也 : 燃費改善に向けた車載用オゾナイザシステムの開発, 日本オゾン協会第 27 回年次研究講演会 (2018)
- [6] 井上貴裕, 民田太一郎, 林潤, 川那辺洋 : 昇圧環境下における誘電体バリア放電を用いた希薄予混合気の点火特性, 第 30 回内燃機関シンポジウム (2019)