3-15

レーザーブレイクダウンを用いた長距離放電形成の最適化と点火への応用に関する研究

日大生産工(院) ○福見 侑也 産総研 高橋 栄一・古谷 博秀 日大生産工 今村 宰・秋濱 一弘

## 1. 緒言

近年,地球温暖化防止のための化石燃料の有 効活用,並びに内燃機関からの排ガスのクリー ン化のために輸送機器のエンジンにおける更 なる性能向上や環境負荷の低減が急務となっ ている.これらの問題を改善する一つの手法と して希薄予混合燃焼を採用することによる熱 効率の向上や排ガスのクリーン化が挙げられ る.しかし、希薄化を進めるに従い、従来の火 花点火方式では点火が困難になり且つ,火炎が 伝播しにくくなるなどの問題がある.そのため, 点火の強化が必要となるが,従来の取り組みと して、放電エネルギーの強化やレーザーによる 多点点火などの研究が行われてきた[1][2]. レ ーザー点火は電極が無いため初期火炎核の成 長時に電極への熱損失が無い利点を有するが, ブレイクダウンポイントからの点状の点火と なり、より希薄燃焼に効果的な体積的な点火を 実現する必要があると考えられる.

レーザーによる雷の誘導実験,あるいはレー ザートリガースパークギャップスイッチなど では、レーザーにより形成された電離チャンネ ルにより長距離放電が形成できることは知ら れており,点火装置への応用が検討されている [3].しかし、このレーザーブレイクダウンを 用いて形成した長距離放電を希薄予混合気の 点火に用いた詳細な研究は行われていない.

本研究では、電極間にレーザーブレイクダウ ンを起こすことで従来困難であった数十ミリ メートルオーダーでの長距離放電を可能とし、 その長距離放電による点火を行う「レーザーブ レイクダウン支援火花放電点火法」の開発をめ ざしている.今回はまず、長距離放電の形成に 必要な、放電しきい値電圧のレーザーブレイク ダウン形成時刻依存性を調べると同時に高速 フレーミングカメラを用いることによって、長 距離放電形成機構について検討を行った.更に 本手法で形成した長距離放電による希薄予混 合気への予備的な点火実験結果について報告 する.

#### 2. 実験方法および実験方法

Fig.1にレーザーブレイクダウン支援火花放 電に関する実験装置概略図を示す.Nd:YAG レーザー(波長532nm,パルス幅7ns)光を, 凸レンズ(焦点距離150mm)を用いて電極間に 集光しブレイクダウンを形成した.続いて,高 電圧パルスを電極に印加し放電を形成した. Fig.2の実験シーケンスに示すように,このレ ーザーブレイクダウン形成時刻と電圧パルス 印加までの時間差をΔtとして,放電しきい値 電圧に対する影響を調べた.

放電しきい値電圧の評価に関して,10回の試 行で放電発生確率が50%となる電圧をしきい 値電圧とした.印加した電圧とレーザー照射の 時間差 $\Delta$ tによるしきい値電圧値の変化を記録 し,最も低電圧で放電可能な最適な $\Delta$ tを調べた.

レーザーおよび高電圧パルスの印加時刻は ディレイパルスジェネレーター(DG535)に より制御した.この時の放電の様子を最短5ns で12フレーム連続撮像ができる超高速度フレ ーミングカメラを用いて計測した.電圧パルス 波形,および電流波形をそれぞれプローブによ り計測した.





Study on optimization of long-distance electric discharge formation by laser breakdown and application to the ignition

Yuya Fukumi, Eiichi Takahashi, Hirohide Furutani, Osamu Imamura,Kazuhiro Akihama



Fig. 2 Temporal Sequence of laser and HV

また、ブレイクダウンの形成に関し、Fig.3 に示す様に、一点ブレイクダウン(以下一点)に よる放電以外にハーフミラーを光路に加え、二 点直列でのブレイクダウン(以下二点直列)、さ らに焦点位置をずらした二点稲妻型ブレイク ダウン(以下二点稲妻型)での実験も行い、3つ のパターンでの放電特性に関して知見を得た. 電極間距離をDとした放電形成位置に関して、 今回の実験では一点での放電において、 A:B=1:1とし、直線状に放電が起こるようにし た.また、二点直列及び二点稲妻型について A:B:C=1:1:1になるようにブレイクダウンの位 置を設定し、さらに稲妻型については Y=1.5[mm]の条件で実験を行った.



Fig.3 Position relations of electrode and

Fig.4に燃焼に関する実験装置概略図を示す. 定容容器中でレーザーブレイクダウン支援点 火実験とレーザー点火の比較実験を行った.初 期 圧 力 を 0.1[MPa] と し, 電 極 間 距 離 D=10[mm]に対して,レーザーブレイクダウン を電圧印加の50[ $\mu$ s]前( $\Delta$ t=-50[ $\mu$ s])に形成 し、レーザー点火に対する燃焼圧力履歴を比較 した.



Fig.4 Experimental setup of combustion

## 3. 結果及び考察

#### 3.1. 放電特性

はじめに、レーザーブレイクダウン形成と電 圧印加間の $\Delta$ tに対するしきい値電圧の依存性 を調べた.レーザー出力を約160[mJ],電極間 距離を5[mm]の条件での結果をFig.5 に示す. 放電しきい値電圧は $\Delta$ t が-50[ $\mu$ s]において 最少となった.電圧の印加中にブレイクダウン を生成した場合にはしきい値電圧は単調に増 大した.これは、ブレイクダウン形成後に電圧 を印加している時間幅が減少することによる ものと考えられる.この様に、電圧を印加する 前にレーザーブレイクダウンを形成すること でしきい値電圧を低下させられることが明ら かとなった.

次に電極間距離に対する,しきい値電圧依存 性,及びそれぞれの条件において求められた最 適 $\Delta t$ について比較を行った結果をFig.6 に 示す.一点ブレイクダウンによる放電の結果で あり,レーザー出力約80[mJ]を用いて実験を 行った.電極間距離が大きくなるにつれ,電極 間距離で規格化した電圧値が大きくなってい る結果が得られた.また,これらの条件におい ても,最適 $\Delta t$ が存在し,電極間距離が離れる ほど最適値が増大することが分かった.



Fig.5 Relation between discharge threshold voltage



Fig.6 Relation between normalized discharge threshold voltage and delay time  $\Delta t$  for various electrode distances.

また、レーザー出力を80[mJ]で電極間距離 を15[mm]と一定にした時、それぞれの放電形 式によるしきい値電圧値の比較の結果をFig.7 に示す.図より同じ電極間距離であれば、二点 直列による放電が最も低電圧で放電が可能で あることがわかる.



Fig.7 Threshold discharge-voltages vs delay time for various laser breakdown configurations

### 3.2. 放電形成画像

Fig.9 に,高速フレーミングカメラで撮影した例として特に稲妻型放電の短絡の放電形成 過程を撮影し,発光強度面積が最も大きい画像 を選定し比較したものを示す.

Fig.9(a)にレーザー出力の変化による放電形 成の画像を示す.  $\Delta$  t=50[ $\mu$  s],印加電圧 13.9[kV],電極間距離15[mm]の条件で観察を 行った.黒色部分が火花放電による発光となっ ており、レーザー出力が増加するにつれ黒色部 分の面積が小さくなっていることが確認でき る.この現象は、レーザー出力の増加による、 レーザーブレイクダウン面積の増大及び絶縁 破壊によるプラズマ拡散の広域化(図中点線) により絶縁体である空気間の距離が短縮した ためであると考えられる.

次にFig.9(b)に印加電圧及び電極間距離は変 化させず、レーザー出力を199[mJ]と一定とし、  $\Delta$ tの変化による放電形成の比較を行った.  $\Delta$ t=-50[ $\mu$ s]のとき、図中点線で示すレーザー ブレイクダウンによる初期段階のプラズマ拡 散領域が最大となることがわかる. このことか ら、この条件下での高電圧パルスからの最適  $\Delta$  tは $\Delta$ t=-50[ $\mu$ s]の時であると考えられる.

## 3.3. 本点火法による圧力履歴

Fig.8 にレーザー点火とレーザーブレイクダ ウン支援点火によるメタン予混合燃焼の圧力 履歴を示す. Φ=0.67 においては,レーザー点 火とレーザーブレイクダウン支援点火に大き な差は見られなかった.しかし,レーザー点火 の希薄限界付近であるΦ=0.55 での燃焼にお いて圧力履歴に大きな差が見られた.レーザー 点火による燃焼は0.2[MPa]付近までしか圧力 上昇が見られず,圧力値からレーザーブレイク ダウン位置近傍のみの部分燃焼で火炎伝播が 行われていないと考えられる.それに対してレ ーザーブレイクダウン支援点火は,点火による 圧力上昇及び火炎伝播が見られ,点火性の向上 が見られた.

# 4. 結言

電極間にレーザーブレイクダウンを形成し 長距離放電を形成する点火強化技術である、

「レーザーブレイクダウン支援放電点火」に関 する放電基礎実験,および予備的な点火実験を 実施し,以下の知見を得た.

(1)電圧を印加する前にレーザーブレイクダウンプラズマを電極間に生成することで、放電しきい値電圧が低下することが明らかとなった.
(2) 一点による放電よりも二点での放電の方がより放電しきい値電圧は低下するが、稲妻状の場合には直線状2点と比較して増大する.

(3)予備的なメタン予混合気への点火実験においてレーザーブレイクダウン支援火花放電点 火法はレーザー点火よりも希薄予混合気においてより高い燃焼率を示した.

(4)レーザー出力の増大により,絶縁破壊領域 が拡大し,より低電圧での放電が可能であると 示唆された.

(5) ブレイクダウンの生成からプラズマが拡散 するまでに最適な時間が存在し,適切な時間で 電圧を印加することにより,低電圧での放電が 可能となっていると考えられる.

### 5. 参考文献

[1]古谷. ほか:レーザーによる燃料制御技術の開発,三井造船技報,199,(2010-2)
[2]林. ほか:レーザー誘起ブレイクを用いた着火における予混合気初期温度の影響,日本機械学会論文集(B編)

[3]「レーザー誘起型火花放電点火装置」 特開 2009-97427



(a) Change of laser power

(b) Change of delay time

Fig.8 Images of zigzag discharge observed by ultra fast framing camera



Fig.9 Pressure histories of laser ignition and laser breakdown assisted ignition.