レーザーブレイクダウン支援火花放電点火における

放電特性に関する研究

日大生産工(院) 〇瀬川泰聖 日大生産工 秋濱一弘 大熊康典 髙橋栄一 山崎博司 今村宰

1. 緒言

2050 年までのカーボンニュートラル宣言 を受け,近年自動車を始めとする内燃機関で は、化石燃料の有効利用や地球温暖化、大気 汚染防止の観点から、燃費の向上と低エミッ ション化が必須となってきている. その対策 として, 希薄燃焼, 高過給運転, 高 EGR 化, 筒内流動場の活用等の技術が挙げられる. そ の1つである希薄燃焼技術では、熱効率の向 上や NOx 等の有害な排気ガスの低減が期待 できる.しかし、過度な希薄化を図った燃焼 では火炎伝播速度が低下することや、火花放 電点火における点火不良が生じる懸念があり, これらを改善するためには、点火の強化が必 要になる. そのため, 放電エネルギーの強化 やレーザーによる点火法の導入など、様々な 点火強化方式の研究がこれまでに行われてき た.

一方、レーザーによって電離チャンネルを あらかじめ生成することで、長距離放電が可 能であることは知られており、点火装置への 応用も検討されている。特に希薄燃焼技術へ の応用が試みられている。

そこで本研究では、レンズで集光したレー ザーを気体に照射することで気体をプラズマ 化させる手法を用いて、火花放電を発生させ るための電極間の任意の位置でプラズマを生 成し、パッシェン則に依存しない電極間距離 の長い火花放電を可能とする「レーザーブレ イクダウン支援火花放電点火法(Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition: LBALDI)」を開発することを目的と する.これは,希薄燃焼において,火花放電 単体よりも初期火炎核が拡大出来るため,「火 花点火内燃機関における希薄予混合気への体 積的な広域点火の効率化」に関する技術に応 用できる.

前報¹)では、LBALDIにおけるレーザー光の 照射と電圧印加の時間差をパラメータとして、 放電確率の電極間距離依存性を取得するため の実験を行い、レーザー光の照射と電圧印加 の時間差がLBALDIの放電特性に及ぼす影響 を調べた.

今回は、前報と同様のパラメータを用い、 放電確率 100%を維持する最大電極間距離を 求め、その時の放電特性(電圧値・電流値・レ ーザー照射時期)を体系的に測定した.電圧印 加から放電までに要する時間や放電時の電圧 値、レーザー照射時期すなわちレーザー誘起 プラズマ発生時期などを調べた.また、 Intensified CCD (ICCD)カメラを利用して LBALDI 放電の放電画像を取得し、レーザー ブレイクダウンとそれによって引き起こされ る火花放電の関係やレーザーブレイクダウン プラズマが及ぼす影響などを調べた.

2. 実験

使用した実験装置の概要を図1に示す. 半波 長板と偏光ビームスプリッタによってエネル ギーを調整した Nd:YAG レーザー光(波 長:532nm, パルス幅:7ns)を反射ミラーで誘導 し,レンズ(f=150mm)で集光して放電電極間 にレーザーブレイクダウンプラズマを生成さ せる.電極には電極径:2.5mmのプラグ電極を

Study on Discharge Characteristics of Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition (LBALDI)

Taisei SEGAWA, Kazuhiro AKIHAMA, Yasunori OHKUMA, EIICHI TAKAHASHI and Hiroshi YAMASAKI and Osamu IMAMURA



①Nd:YAG laser ② Crystaline quartz half wave plate ③Polaroid beam splitter ④Mirror
⑤Lens ⑥ Spark plug ⑦ H.V. Probe ⑧Igniter ⑨Battery ⑩Delay generator
⑪Oscilloscope ⑫Current probe ⑬High speed camara

使用し,自動車用イグニッションコイルを用 いてレーザーの発振に同期させたパルス電圧 (ピーク電圧:~31kV)を電極間に印加する.レ ーザー入射タイミング,電圧印加開始時間, イグナイターの充電時間は,ディレイパルス ジェネレータ(Stanford Research Systems社製: DG645)を用いて制御する.レーザー発光は, Si 増幅フォトディテクター(Thorlab社 製:PDA10A-EC)を用いて測定した.本実験に おける電極間の放電エネルギーは20mJ,レー ザーエネルギーは100mJ/pulseである.

図2に、本報の解析に使用する電圧印加を基準としたΔt, Δt_d,およびV_dの定義を示す.Δt は電圧印加開始とレーザー照射との時間差, Δt_dは電圧印加開始と放電開始(電流が急増す る時期)との時間差で、V_dは放電開始時の電圧 値である.

 Δt が, $-50\mu s$ (レーザー照射後に電圧印加), $0\mu s$ (レーザー照射と同時に電圧印加), $+25\mu s$, $+50\mu s$, $+75\mu s$, $+100\mu s$ (レーザ ー照射前に電圧印加)の6条件について LBALDI放電を行い,放電確率が100%から0% になるまでの電極間距離を調べた.これらの 測定から,各条件において放電確率100%を維 持する電極間距離の最大値 D_m (最長放電距 離)を求めた.

図 1 実験装置概略図

さらに上記に加えて,LBALDI放電現象を 露光時間5µsで固定した ICCDカメラで撮影 し,代表的な条件における電極間の様子を調 べた.

なお、レーザー照射角度は電極間に対して 90°に固定し、放電確率は同じ電極間距離で行 った30回の試行から算出した.



図2 電圧印加時間を基準とした Δt, Δtdの定義

実験結果および考察

3.1 レーザー誘起プラズマの放電支援効果

図3に、電圧印加開始とレーザー照射との時間差Δtと最長放電距離D_mおよび放電開始

電圧 V_d の関係を示す. 図中の \bullet と \blacktriangle はそれぞれ LBALDI 放電における D_m (LBALDI)と V_d (LBALDI), Oと口はそれぞれ SI(Spark Ignition: レーザーを入射しない通常の電極間 火花放電)における D_m (SI)と V_d (SI)である. また,青線は放電しない時の電圧波形である.



 D_m (SI)の 14.5mm に比べて D_m (LBALDI)の 最大値は約 25.0mm と大幅に距離が伸びてお り、レーザー誘起プラズマによる放電の長距 離化が確認できる.

一方、 $\Delta t = +100\mu s$ の場合、 D_m (LBALDI)が 17.0mm で V_d (LBALDI)が 15kV となっている. SI の場合と比べると D_m (SI)が 14.5mm で上 記の D_m (LBALDI)よりも短いにもかかわらず V_d (SI)は 29kV で上記の V_d (LBALDI)よりも大 きいことから、LBALDI 放電では放電電圧閾 値が大幅に低下していることがわかる. この ことから、レーザー誘起プラズマによる放電 電圧低下という支援効果が確認できる.

また、電圧印加時にレーザー照射をしてい る $\Delta t = +25\mu s$ 、 + 50 μs 、 + 75 μs 、 + 100 μs の D_m (LBALDI)は、印加電圧値に概ね沿うよう な形で推移している. このことから、 D_m (LBALDI)が最大となる $\Delta t = +50\mu s$ では、印 加電圧の最大値付近においてレーザー照射を することで、レーザー誘起プラズマによって 放電が長距離化していることがわかる.

3. 2 LBALDI が最長放電距離 (Dm) に及ぼす影響 図 4 に、 Δt と Dm および電圧印加開始と放電 開始の時間差Δt_d関係を示す. 図中の●と▲は それぞれ LBALDI 放電におけるDm (LBALDI) とΔt_d(LBALDI), Oと□はそれぞれ SI におけ ΔDm (SI) とΔt_d(SI)である.



 $\Delta t = -50\mu s, 0\mu s, +25\mu s, +50\mu s の 場$ 合における Δt_d は70~75 μs となっており,放電 までに要する時間の差異は少なく,印加電圧 最大値付近で何れも放電を開始していること が確認できる.

ここで注目される点は、 D_m (LBALDI)が同じ 値を示している $\Delta t = -50\mu s$, $0\mu s$, $+25\mu s$ の 場合である. レーザー誘起プラズマ発生と放 電開始に時間差が生じていることが分かるが、 特に電圧印加のない $\Delta t = -50\mu s$, $0\mu s$ におい ても D_m (LBALDI)が減少しない. このことは、 レーザー誘起プラズマの寿命が長いことを示 している. $\Delta t = -50\mu s$ の場合の放電までの時 間を考えると、レーザー誘起プラズマの寿命 は120 μs 以上であることが推測される.

3.3 放電時の画像計測

 $\Delta t = +50\mu s$ および $\Delta t = -50\mu s$ における LBALDI放電を捉えた画像と放電特性の一例 を,それぞれ図5と図6に示す.画像左側が接 地電極(負極側),画像右側が高圧電極(正極側 で,レーザーは画像上部から照射している.





図5 Δt=+50µs, Dm:25mm で 放電が確認された時の画像と 電圧, レーザー発光, 電流の波形



は 0 丘 00 µ 3, Dm 20.0mm C 放電が確認された時の画像と 電圧, レーザー発光, 電流の波形 図5では、電極間の中央部に強いレーザー プラズマ発光が観測されており、火花放電の 伸長に寄与しているもと考えられる.プラズ マの上部に見えるモヤのようなものは、レー ザープラズマ発光の変形により生じるもので ある²⁾.

一方,図6からは、画像上では図5のよう な強いレーザープラズマ発光は見られないが、 D_m (LBALDI)が1.5mmしか違わないことから、 レーザープラズマの寿命とその効果時間が非 常に長いことがわかる.

4. 結言

本研究では、電圧印加開始とレーザー照射 との時間差Δtを変更してLBALDI放電実験を 行い、電流・電圧波形と高速度カメラを利用 した画像から放電状況を調べた結果、以下の 知見を得た.

- Δtは、印加電圧最大値付近にレーザー照射 を行うことで(Δt = +50µs)、最長距離放電 となる.
- ・ 最長放電距離は、印加電圧最大値付近を境にし、レーザー照射時の印加電圧値に依存する場合(Δt = +50μs, +75μs + 100μs)と、レーザー誘起プラズマによる支援に依存する場合(Δt = -50μs, 0μs, +25μs)が存在する.
- 本実験の場合、LBALDI放電に及ぼすレー ザーブレイクダウンプラズマの支援効果 は120µs以上である。

以上のことから,LBALDI放電における放 電距離の伸長は、印加電圧の作用が支配的な 場合とレーザープラズマの作用が支配的な場 合があることが今回の実験で示された.

5. 参考文献

- 瀬川泰聖,レーザー誘起ブレイクダウン による長距離火花放電に関する研究,第 38回プラズマ・核融合学会年会,2021
- Harilal, B. E. Brumfield and M. C. Phillips, Lifecycle of laser-produced air sparks, Phys. Plasmas 22, 063301(2015)