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.

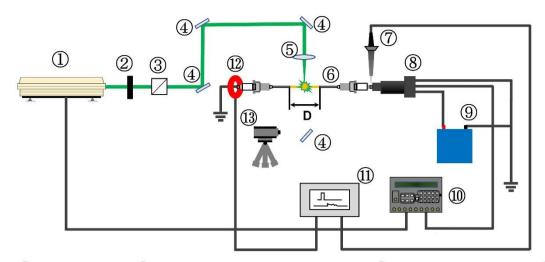
今回は、前報と同様のパラメータを用い、放電確率 100%を維持する最大電極間距離を求め、その時の放電特性(電圧値・電流値・レーザー照射時期)を体系的に測定した。電圧印加から放電までに要する時間や放電時の電圧値、レーザー照射時期すなわちレーザー誘起プラズマ発生時期などを調べた。また、Intensified CCD (ICCD)カメラを利用してLBALDI 放電の放電画像を取得し、レーザーブレイクダウンとそれによって引き起こされる火花放電の関係やレーザーブレイクダウンプラズマが及ぼす影響などを調べた。

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
- ①Oscilloscope ②Current probe ③High speed camara

図 1 実験装置概略図

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_a 、および V_a 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_a 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_a 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。

さらに上記に加えて、LBALDI放電現象を 露光時間 5μ s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.

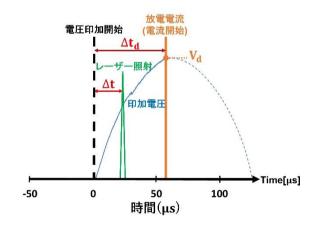


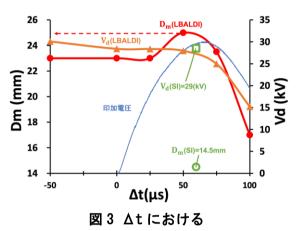
図2 電圧印加時間を基準とした Δt, Δtdの定義

3. 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 \Box 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.



最長放電距離 Dm と放電時の電圧 Va の関係

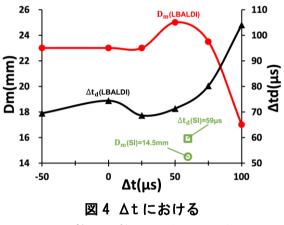
 $D_m(SI)$ の 14.5mm に比べて $D_m(LBALDI)$ の 最大値は約 25.0mm と大幅に距離が伸びており、レーザー誘起プラズマによる放電の長距離化が確認できる.

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、V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 $\Delta t = +25\mu s$ 、 $+50\mu s$ 、 $+75\mu s$ 、 $+100\mu s$ 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 D_m 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 \blacksquare と Δt それぞれ LBALDI 放電における D_m (LBALDI) と Δt_d (LBALDI), \Box と \Box はそれぞれ SI における D_m (SI)と Δt_d (SI)である。



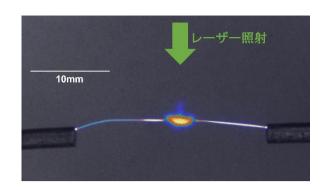
最長放電距離 Dm と Δtd の関係

 $\Delta t = -50\mu s$, $0\mu s$, $+25\mu s$, $+50\mu s$ の 場合における Δt_a は $70\sim75\mu s$ 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.



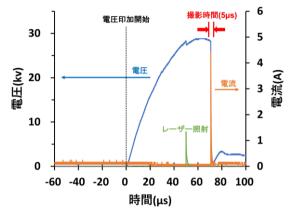
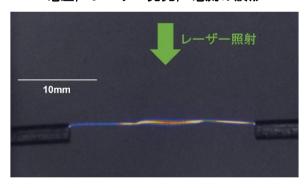


図 5 Δt=+50μs, Dm:25mm で 放電が確認された時の画像と 電圧、レーザー発光、電流の波形



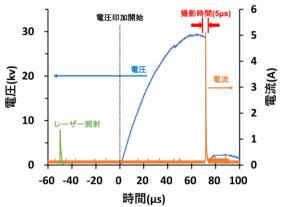


図6 Δt=-50μs, Dm:23.5mmで 放電が確認された時の画像と 電圧, レーザー発光, 電流の波形

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($\Delta t = +50\mu s$)、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 ($\Delta t = +50\mu s$, $+75\mu s + 100\mu s$) と、レーザー誘起プラズマによる支援に依存する場合($\Delta t = -50\mu s$, $0\mu s$, $+25\mu s$)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

- 1) 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
- 2) Harilal, B. E. Brumfield and M. C. Phillips, Lifecycle of laser-produced air sparks, Phys. Plasmas 22, 063301(2015)