## レーザーブレイクダウン支援火花放電現象に関する研究

日大生産工(院) 〇相川理子 日大生産工 大熊康典 秋濱一弘 齋藤 郁 髙橋栄一 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<sup>1)</sup>.

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できるため、「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<sup>2)</sup>では、レーザー照射の方向や位置、レ ーザー照射タイミングを変化させた場合の放 電現象を Intensified CCD (ICCD)カメラで撮 像し、レーザーブレイクダウンプラズマが長 距離火花放電の形成に及ぼす影響を調べた.

今回は、レーザーブレイクダウンプラズマ によって火花放電距離の延伸に対して、照射 レーザーおよび火花放電のエネルギー、レー ザーの照射タイミング、および放電までの遅 れ時間と放電距離の関係を体系的に調べ、 LBALDIの特性を検討した.

### 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 ザー照射タイミング,電圧印加開始時間,イ

### Study on Laser Breakdown Assisted Spark Discharge Phenomenon

Riko AIKAWA, Yasunori OHKUMA, Kazuhiro AKIHAMA, Iku SAITO, Eiichi TAKAHASHI and Osamu IMAMURA



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

Fig.1 実験装置概略図

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 いて、火花放電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最大で 100mJ/pulse である.

図2に、本報の解析で使用する、電極間の 印加電圧放電波形、電極間の電圧印加開始時 間を基準としたレーザー照射タイミングΔt およびレーザー照射から放電が起こるまでに 要する時間ΔTの定義を示す.

本実験では、レーザーの照射角度を対向し た電極に対して垂直に設定し、レーザー照射 のタイミングがΔtが-50µs(レーザー照射後 に電圧印加)、0µs(レーザー照射と同時に電 圧印加)、+50µs(レーザー照射前に電圧印加) の3条件について、レーザーエネルギーを OmJ/Pulse から 100mJ/Pulse まで変化させた LBALDI 放電を行った.その際に各条件にお いて、電極間距離を SI(Spark Ignition:レーザ ーを照射しない通常の火花放電)における放 電確率が 100%となる最長距離を基準に 1mm ずつ伸ばしていき、放電確率が 100%を維持す る最長電極間距離を調べた.

次節で示す図3および図4のグラフにおい

て,各実験データは10回の試行による平均値, エラーバーは標準偏差を示す.



 $\Delta t$ および $\Delta T$ の関係

#### 実験結果および考察

先行研究より、電極間の印加電圧が最大と なる時間付近にレーザーを照射すると放電距 離が最も伸びることから<sup>3)</sup>、このタイミング となる $\Delta t = +50\mu s$ に着目して、さらに詳細に 調べた.

# 3.1 $\Delta t = +50 \mu s$ におけるレーザー照射から 放電までの時間 $\Delta T$ とレーザーブレイク ダウンプラズマの関係

図3に、 $\Delta t = +50\mu s$ におけるレーザー照射から放電までの時間 $\Delta T$ と電極間距離の関係

を示す. ΔT は電極間距離が 19mm までは変化 が小さく, 概ね一定であるが, 20mm 以降は急 激に上昇し, レーザーエネルギーが 80mJ/Pulse と 100mJ/Pulse ではほぼ同じ傾向を 示していることが確認できる.



# Fig. 3 Δt = +50µsにおけるレーザー照射 から放電までの時間ΔTと電極間距 離の関係

このことをレーザーブレイクダウンプラズ マの放電メカニズムから考える.電極間距離 が19mm以下ではレーザー照射後ただちに放 電が開始される.このとき生成されたプラズ マの空間的大きさは小さく,そこで生成され た電荷が放電のトリガーの役割をして放電が 開始されると考えられる.また,19mmまでは 放電開始までプラズマの大きさがほとんど変 化しないため,放電までの時間が概ね一定で あると考えられる.

一方,20mm 以上では,19mm 以下のような 局所的な初期電荷では電子なだれによる電極 間の放電が困難となる.しかしプラズマが空 間的に広がり,初期電荷の供給位置が電極に 近づけば放電が可能となる.この場合はプラ ズマの空間的な広がりが放電開始遅れ時間 ΔTを支配することになる.したがって,電極 間距離の伸長とともに放電までの時間が長く なると考えられる.

さらに、電極間距離が 22mm のときに着目

すると、ΔTが 60mJ/Pulse から 100mJ/Pulse で は5µsから10µs程度であるが、50mJ/Pulse では 他のレーザーエネルギーと比べて放電までに 約25µsという長い時間を要しており、最長放 電距離も短い.このことは、照射レーザーエ ネルギーが小さいためプラズマの広がり速度 が遅くなり、放電開始が遅れたと考えられる. 以上から、さらに放電距離を伸ばすためには、 レーザーブレイクダウンプラズマを迅速に広 げる必要があり、本研究の実験系では 60mJ/Pulse 以上のレーザーエネルギーが必要 であることが示唆される.

# 3.2 △t = +50µsにおける単位長さあたりの 火花放電のエネルギーと電極間距離の 関係

図4に、Δt = +50µsにおける単位長さあた りの火花放電のエネルギーと電極間距離の関 係を示す.単位長さあたりの火花放電のエネ ルギーは、放電電流が流れている時間範囲に おいて、電圧波形と電流波形から算出した値 をそれぞれの電極間距離で割った 1mm あた りの火花放電のエネルギーである.

電極間距離が 19mm までは電極間距離の伸 長とともに単位長さあたりの火花放電のエネ ルギーが低下しているが, 20mm 以降は概ね 一定となっていることがわかる.



Fig.4 Δt = +50µsにおける単位長さあたり の火花放電のエネルギーと電極間距 離の関係

この結果について検討する.放電時に生成 されたレーザーブレイクダウンプラズマの周 辺部と電極の間の距離をDとすると,電極間 距離が 19mm までは前述のように,レーザー ブレイクダウンプラズマの大きさがほとんど 変化しないことから,電極間距離の伸長に伴 ってDが大きくなり,単位長さあたりの火花 放電のエネルギーが低下すると考えられる.

一方,20mm 以上は、どの電極間距離におい てもDが一定の長さであると仮定する.すな わち 3.1 節で述べたように、プラズマが空間 的に広がり初期電荷の供給位置が電極に近づ き、Dの臨界長さ(本研究では19mm)を維持 しつつ放電していると考える.このとき、電 極間距離の伸長とともにプラズマも広がるが、 Dが一定であるため、電極間距離が伸びても 単位長さあたりの火花放電のエネルギーは低 下しない.以上が20mm 以上で単位長さあた りの放電エネルギーが一定になった理由と考 えられる.

### 3.3 長距離点火への有用性

ここでは本研究の長距離放電の点火・燃焼 における有用性を検討する.図4から,電極 間距離が20mm以上は単位長さあたりの火花 放電のエネルギーがほぼ一定であるため,こ の範囲であれば最長放電距離においても安定 して点火をすることができ,長距離点火が可 能となることが示唆される.また,図3のΔT と電極間距離の関係から,80mJ/Pulse と 100mJ/Pulse ではほぼ同じ傾向を示しており, どちらも最長放電距離が24mmであることか ら,本実験で用いた装置では,レーザーエネ ルギーが80mJ/Pulse 以上のときに最長で 24mm もの距離が点火可能である.以上のよ うに点火における有用性が示された.

#### 4. 結言

本研究では、各レーザー照射タイミングΔt において、レーザーエネルギーと電極間距離 を変化させて LBALDI 放電実験を行った結果, 以下の知見を得た.

- レーザー照射後50μsに電圧を印加する Δt = +50μsにおいて、電極間距離が20mm 以上では、プラズマが空間的に広がり、放 電初期電荷の供給位置が電極に近づけば 放電が可能となる.放電距離を伸ばすため には、レーザーブレイクダウンプラズマを 迅速に広げる必要があると考えられる.
- Δt = +50µsでは、電極間距離が 20mm 以上のときに単位長さあたりの火花放電のエネルギーがほぼ一定となるため、最長放電距離 (24mm)においても安定した点火が期待できる.

以上のことから,長距離放電の実現には,

ー定以上のレーザーブレイクダウンプラズマ の広がりやレーザー照射から放電までの時間, レーザーエネルギーが必要であり,また長距 離点火への有用性があることが今回の実験で 示された.

## 5. 参考文献

- Fukumi, Y., Imamura, O., Akihama, K., Takahashi, E., and Furutani, H., "Laser Breakdown-Assisted Long-Distance Discharge Ignition", SAE Paper 2015-01-1897
- 2)相川理子、「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 40回プラズマ・核融合学会年会、2023、 28Cp12
- 3)瀬川泰聖、「レーザー照射と電極間電圧印 加のタイミングがレーザーブレイクダウ ン支援火花放電点火に及ぼす影響」、日本 大学大学院生産工学研究科 令和4年度修 士論文, p.25