

# 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

日大生産工(院) ○齊藤佑哉

日大生産工 秋濱一弘 大熊康典 山崎博司 今村幸

## 1. 研究背景

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た。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。

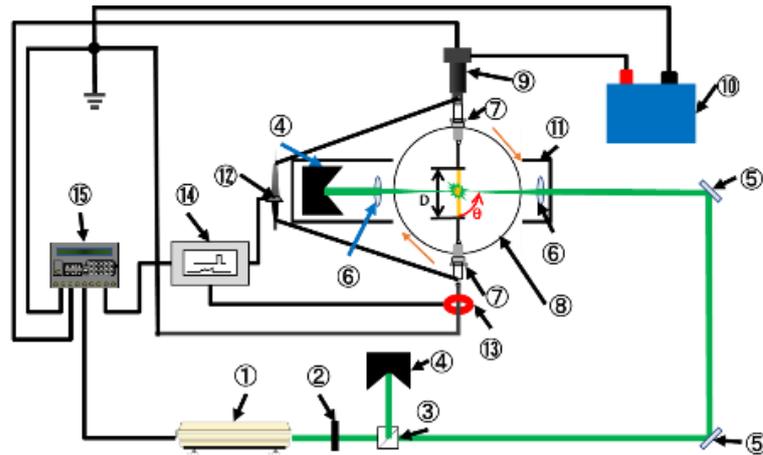
前報<sup>1)</sup>では、放電確率から電極間距離のレーザー入射角度依存性を調べ、放電距離が延びる入射角度の存在を示した。今回は、レーザー入射と高電圧印加のタイミングに着目し、放電確率からレーザー入射タイミングが電極間距離のレーザー入射角度依存性に及ぼす影響を調べた。

## 2. 実験条件

実験装置を図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、反射ミラーを用いて誘導し、レンズ (f=150mm) で集光して放電電極間にブレイクダウンプラズマを生成させる。レーザー入射角度は、図2に示すプラグ電極を設置した回転ステージを回転させて設定する。電極間には、自動車用イグニッションコイルを使用して、レーザーの発振に同期させたパルス電圧 (ピーク電圧:~32kV) を印加する。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) を用いて測定する。本実験では、電極間の放電エネルギーを20mJ、レーザーエネルギーを100mJ/pulseとし、異なるレーザー入射タイミングでレーザー入射角度と電極間距離を変えながら放電確率を調べる実験を行った。

Long Distance Discharge Assisted by Laser Induced Breakdown

Yuya SAITOH, Kazuhiro AKIHAMA, Yasunori OHKUMA, Hiroshi YAMASAKI  
and Osamu IMAMURA



- ① Nd:YAG laser ② Crystalline quartz half wave plate ③ Polarization beam splitter  
 ④ Beam diffuser ⑤ Mirror ⑥ Lens ⑦ Spark plug ⑧ Turntable ⑨ Ignition coil  
 ⑩ Battery ⑪ Rail ⑫ H.V. Probe ⑬ Current probe ⑭ Oscilloscope ⑮ Delay generator

図1 実験装置概略図

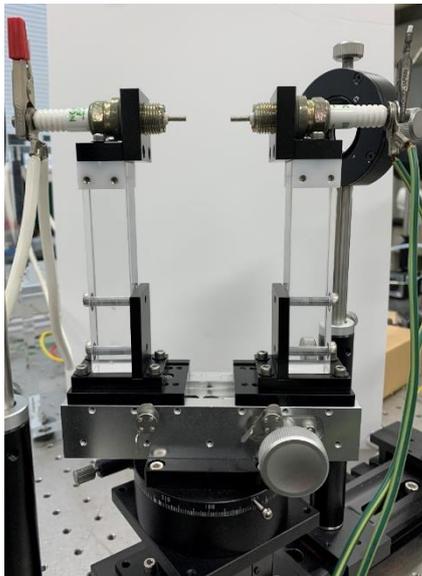


図2 実験で使用した回転ステージ  
 (左側電極:高圧電極, 右側電極:接地電極)

を接地側の電極から45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°としたLBALDIの放電を行い, それぞれの場合において, 放電確率が100%から0%になるまで電極間距離を調べた. 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3 電圧印加時間を基準としたレーザー入射時間  $\Delta t$

電圧印加時間を基準としたレーザー入射時間  $\Delta t$  は図3に示す通り,  $t_{H.V}$  を電圧印加時間,  $t_{Laser}$  をレーザー入射時間とすると, 以下の式で表せる.

$$\Delta t = t_{Laser} - t_{H.V}$$

この  $\Delta t$  が,  $-50\mu s$  (レーザー入射後に電圧印加),  $0\mu s$  (レーザー入射と同時に電圧印加),  $+50\mu s$  (電圧印加後にレーザー入射) の3条件について, 図4に示すようにレーザー入射角度

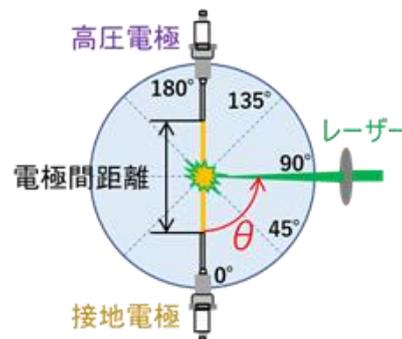


図4 電極位置とレーザー入射角度の関係

### 3. 実験結果

$\Delta t = -50\mu\text{s}$ ,  $0\mu\text{s}$ ,  $+50\mu\text{s}$ における放電が確認された時の印加電圧（青線），レーザー発光（緑線）および放電電流（黄線）の波形をそれぞれ図5, 図6, 図7に示す, また, レーザー入射角度を放電確率と電極間距離の関係を図8, 図9, 図10に示す.

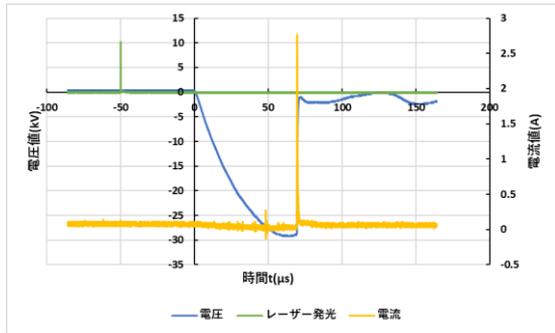


図 2  $\Delta t = -50\mu\text{s}$ , 電極間距離 23mm の印加電圧, レーザー発光, 放電電流の波形

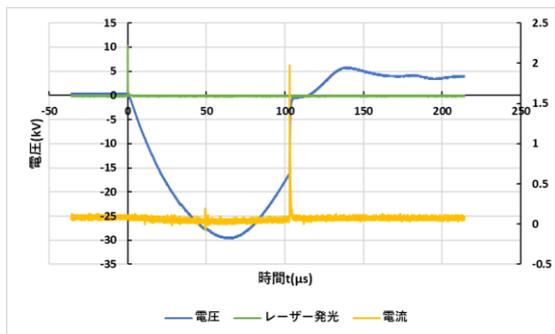


図 3  $\Delta t = 0\mu\text{s}$ , 電極間距離 23mm の印加電圧, レーザー発光, 放電電流の波形

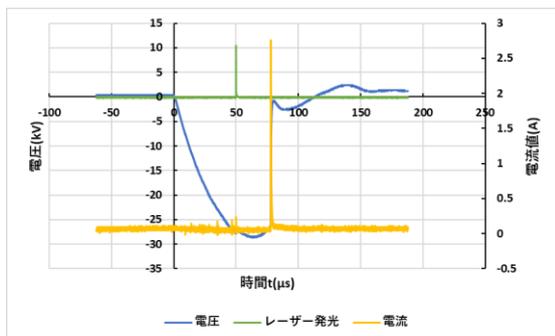


図 4  $\Delta t = +50\mu\text{s}$ , 電極間距離 24.25 mm の印加電圧, レーザー発光, 放電電流の波形

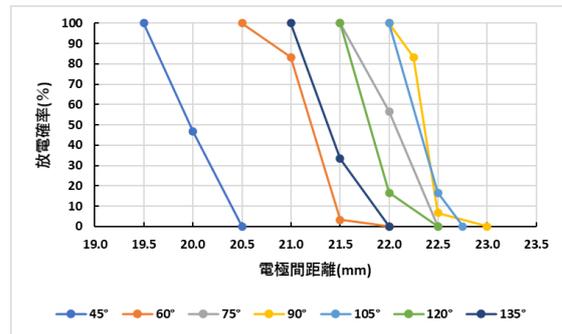


図 5  $\Delta t = -50\mu\text{s}$  における放電確率と電極間距離のレーザー入射角度依存性

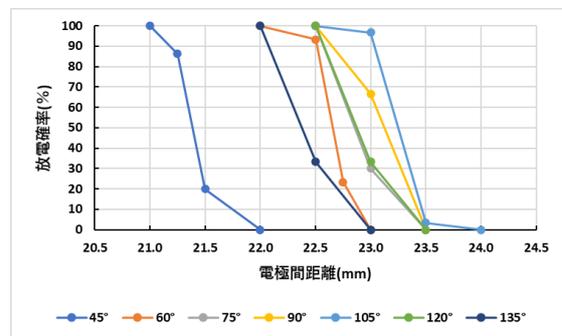


図 6  $\Delta t = 0\mu\text{s}$  における放電確率と電極間距離のレーザー入射角度依存性

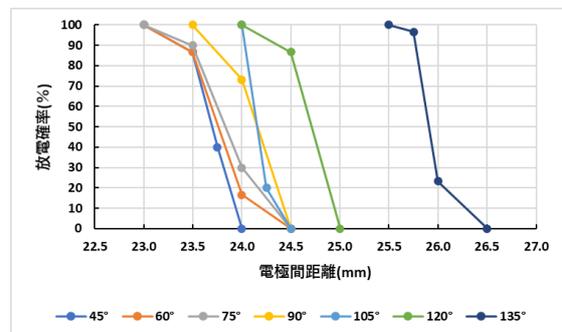


図 7  $\Delta t = +50\mu\text{s}$  における放電確率と電極間距離のレーザー入射角度依存性

図11に, 各種条件における放電確率100%で最長となる電極間距離をレーザー入射角度ごとに読み取り,  $\Delta t = -50\mu\text{s}$ ,  $0\mu\text{s}$ ,  $+50\mu\text{s}$ におけるレーザー入射角度と電極間距離の関係について調べた結果を示す.

レーザー入射角度に着目すると, 全てのレーザー入射角度で, 放電確率100%での電極間距離が,  $+50\mu\text{s} > 0\mu\text{s} > -50\mu\text{s}$ となった. この結果

から、レーザー入射タイミングと放電可能な電極間距離には依存性があることが示唆された。

さらに、 $\Delta t = -50\mu\text{s}$ ,  $0\mu\text{s}$  の場合は、レーザー入射角度が放電電圧印加方向と垂直 ( $90^\circ$ ) よりも、やや高圧電極側から照射した方が、電極間距離が長くなる傾向が見られ、 $\Delta t = +50\mu\text{s}$  の場合は、高圧電極側に近づくにつれて、電極間距離が長くなるという異なる傾向が見られた。この結果から、レーザー入射タイミングが電極間距離のレーザー入射角度依存性に影響を及ぼす事が示唆された。

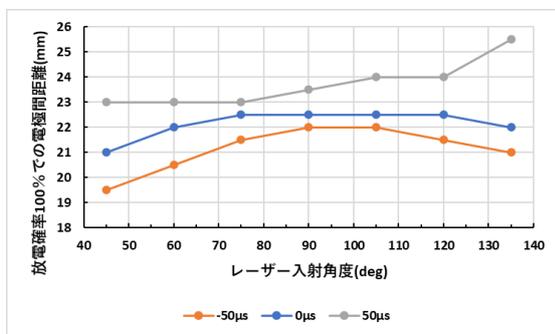


図 8  $\Delta t = -50\mu\text{s}$ ,  $0\mu\text{s}$ ,  $50\mu\text{s}$  におけるレーザー入射角度と放電確率 100%の電極間距離の関係

#### 4. 結言

レーザー入射タイミングを新たなパラメータとしてLBALDIの特性を調べた結果、以下の知見を得た。

(1) 放電確率100%での電極間距離について  
 全てのレーザー入射角度で、放電確率100%での電極間距離が、 $\Delta t = +50\mu\text{s} > 0\mu\text{s} > -50\mu\text{s}$ の順となった。このことは、レーザー入射タイミングと放電可能な電極間距離には依存性があることを示している。

(2) レーザー入射角度の放電確率の電極間距離依存性について

$\Delta t = -50\mu\text{s}$ ,  $0\mu\text{s}$  の場合は、レーザー入射角度が放電電圧印加方向と垂直 ( $90^\circ$ ) よりも、やや高圧電極側から照射した方が、電極間距離が長くなる傾向が見られ、 $\Delta t = +50\mu\text{s}$  の場合

は、高圧電極側に近づくにつれて、電極間距離が長くなる傾向が見られた。

$\Delta t \leq 0\mu\text{s}$  の場合と  $\Delta t > 0\mu\text{s}$  の場合では、レーザー入射角度の放電確率の電極間距離依存性の傾向が異なったため、レーザー入射タイミングが電極間距離 (放電確率) のレーザー入射角度依存性に影響を及ぼす事が今回の実験によって示された。

#### 5. 参考文献

- 1) 齊藤佑哉, 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37回プラズマ・核融合学会年会, 2020