

レーザーブレイクダウン支援火花放電点火(LBALDI) に関する研究

—長距離放電形成の最適化と希薄予混合気の点火特性—

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

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、かつ、火花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様々な点火方式の研究が行われてきた。レーザー点火は電極が無いため初期火花核の成長時に電極への熱損失が無いという利点を有するが、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が知られており、点火装置への応用が検討されている[1]。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 (Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition: LBALDI)」の開発を目指している。今回はまず、長距離放電の形成に必要な、放電しきい値電圧を低減するために、大気圧並びに高圧条件下におけるレーザーブレイクダウン形成時刻の依存性を調べ、放電しきい値電圧の低減の可能性を検討する。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 実験方法および測定方法

本実験において、大気中における基礎放電実験、並びに高圧条件下における可燃性混合気の燃焼を考慮するために定容容器を用いた実験の2つの形式で実験を行った。実験の詳細を以下に記す。

2.1 大気中における放電基礎特性

放電の基礎特性を調べるために、電極は電極の鋭角の影響を避けるために、平等電界を形成する直径2cmの球電極を用い、大気中にて実験を行った。高電圧電源、高電圧スイッチそして計測系を含めた実験装置概略図を Fig. 1 に示す。Nd:YAG レーザー(波長 532nm, パルス幅 7ns)光を、凸レンズ(焦点距離 $f=150\text{mm}$)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。本実験で使用する高電圧スイッチ (HTS 301-03-GSM) は、MOSFET のプッシュプル型で、耐電圧は 30kV を有し、最大 30A のピーク電流を流すことができる。直流高電圧電源にこの高電圧スイッチを組み合わせて用いることで、レーザーブレイクダウンと印加電圧時刻の関係を詳細に調べるために必要な矩形の電圧パルスを発生させることができる。この高電圧スイッチにより最短パルス幅 200ns, 最短立ち上がり時間 20ns, ジッタ 0.1ns 以下の精度で電圧パルスを発生させることができる。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、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%となる電圧を放電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 Δt による放電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 Δt 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。

Study on Laser Breakdown Assisted Long-distance Ignition
— Optimization of long-distance discharge formation and ignition characteristics of lean premixture —

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

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。

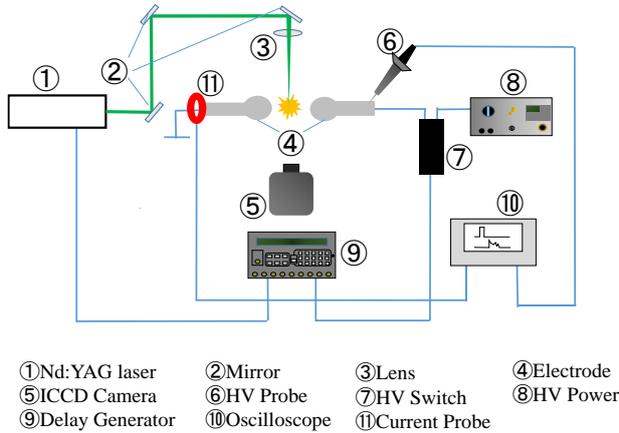


Fig. 1 Experimental setup of open-air experiment

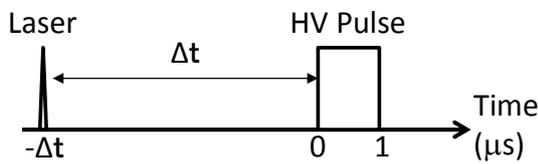


Fig. 2 Temporal Sequence of laser and HV

2.2 定容容器を用いた高圧条件下及び点火基礎実験

Fig. 3 に定容容器を用いた高圧条件下における放電特性及び点火のための実験装置概略図を示す。定容容器を用いた実験では球電極ではなく，長い（数十ミリ程度）中心電極を有する商業用の点火プラグ（抵抗値 4kΩ）を両極端に設置した。放電エネルギーはオシロスコープにより取得した電流と電圧波形から推定した。また，点火実験においては更に電源を商業用のイグニッションコイルとカーバッテリーに変更し，燃料にはメタン/空気の予混合気を用いた。

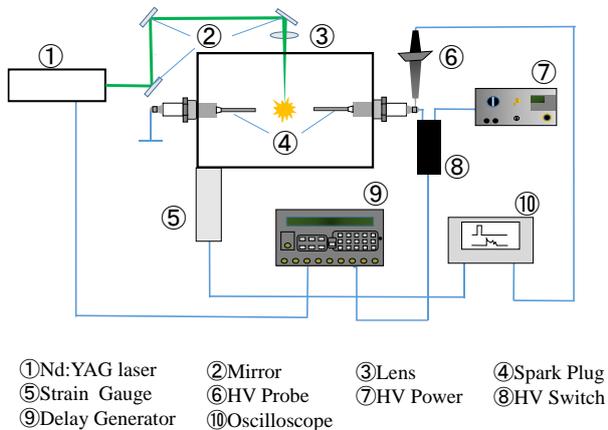


Fig. 3 Experimental setup of constant-volume vessel

3 実験結果および検討

LBALDI の開発の狙いとして長距離放電による体

積的な点火により，希薄条件において点火に達するまでに必要な火炎核の拡大がある。通常，長距離放電は電極間に極めて高い電圧をかけることで形成できる。しかしながら，これは電極の耐久性の減少や多くの絶縁体部品，電力供給量が増加するためコストが増大するといった多くの問題が発生する。一方，現実的な供給電圧レベルで長距離放電を実現することが本手法の狙いの一つのである。

二つの目の狙いは，希薄燃焼限界の拡大である。本手法はレーザースパーク形成を利用しているため，可燃性予混合気において従来のレーザブレイクダウンによる点状・短時間点火では点火困難な希薄予混合気において，長距離放電による点火も加わった LBALDI は点火能力の向上が期待できる。

3.1 LBALDI の放電基礎特性

Fig. 4 に電極間距離 15mm の一点ブレイクダウン型の LBALDI 画像を示す。画像からレーザプラズマの発光と接続される放電チャンネルが見られる。



Fig. 4 Photograph of LBALDI with single laser breakdown and 15mm electrode distance

Fig. 5 に典型的な LBALDI の電流・電圧波形を示す。1μs 幅の高電圧を矩形波を示すように供給している。パルス幅の範囲内に絶縁破壊が起こる必要があり，電圧と電流の上昇により短絡が付随して起こっている。

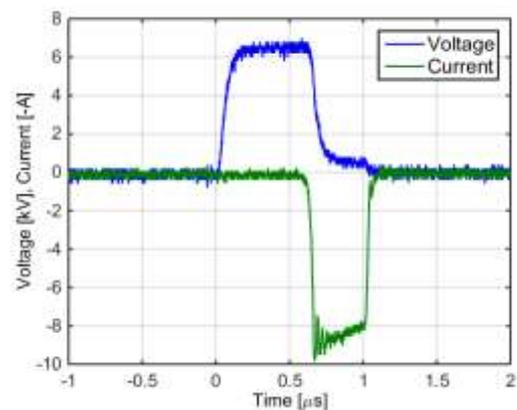


Fig. 5 Typical voltage and current waveforms in open-air discharge experiment

Fig. 6 はレーザー出力を約 160mJ，電極間距離 5mm

時のレーザーブレイクダウン形成と電圧印加間の Δt に対する放電しきい値電圧の依存性を示す。放電しきい値電圧は Δt が $-50\mu\text{s}$ において最小となった。電圧の印加中にブレイクダウンを生成した場合には放電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放電しきい値電圧を低下させられることが明らかとなった。

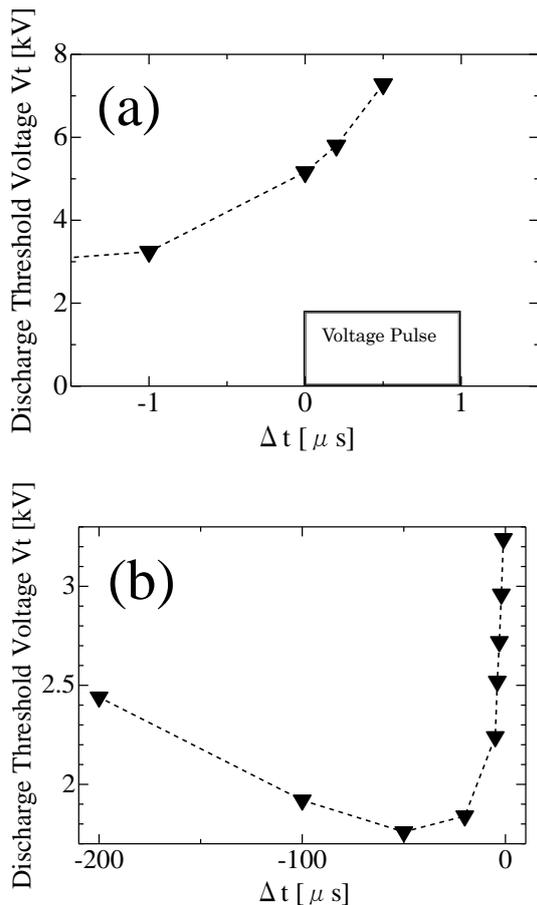


Fig. 6 Dependence of sparkover voltage on delay between laser incidence and high-voltage application. A 160 mJ laser beam was focused with a $f = 100$ mm lens: (a) $-1\mu\text{s} \sim 0.5\mu\text{s}$, (b) $\Delta t = -200\mu\text{s} \sim -1\mu\text{s}$

3.2 高圧条件下における放電基礎特性

LBALDI の内燃機関への応用を考慮して、放電特性の圧力依存性に関する基礎検討を実施した。本実験では定容容器、さらに球電極ではなく商用点火プラグを用いて 0.5MPa まで空気を充填して実験を行った。レーザー出力を 50mJ、焦点距離 $f=100\text{mm}$ の凸レンズを用いてレーザーを集光し、ブレイクダウンを形成した。この時の放電距離は 4mm である。

Fig. 7 に 0.1 から 0.5MPa における最低放電しきい

値電圧値の比較を示す。レーザーブレイクダウンによる支援の有無によって、放電に必要な電圧が大きく異なることが分かる。また、レーザーによる支援のない場合、0.5MPa では点火プラグのセラミック部分に沿面放電が見られ、電極間での通常放電が妨げられ、結果を得ることができなかった。それに対して、LBALDI ではレーザーブレイクダウンによる支援がないものと比べ非常に小さい電圧で放電の形成が可能であることがわかる。また、0.1MPa での LBALDI による放電しきい値電圧値は、2.5kV を示している。これは今回用いた高電圧電源装置の最低電圧値であり、実際の放電しきい値電圧値はさらに小さい。

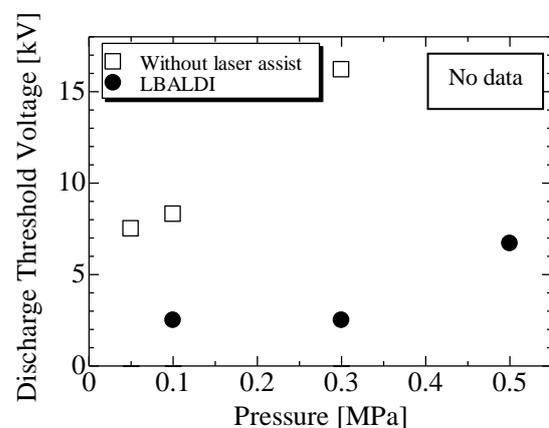


Fig. 7 Threshold sparkover voltage vs. pressure

3.3 LBALDI による希薄条件での点火基礎特性

はじめに、希薄予混合気における点火性能を調べるために、レーザー点火及び LBALDI の点火確率を比較した。それぞれの投入エネルギーを Table 1 に示す。レーザー点火と LBALDI は点火エネルギーを 73mJ に揃えて行った。各点火手法における点火確率の比較を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より LBALDI が最も希薄条件において高い点火性能を示すことが分かった。

次に空気過剰率 $\lambda = 1.67$ の燃焼実験における圧力履歴の比較を Fig. 9 に示す。この時、点火は時間軸の 0 秒で行われている。両点火手法とも点火確率が 100% であるにも関わらず、圧力上昇率に違いが見られた。この結果から、LBALDI はレーザー点火に比べ、高い熱発生率を示すことが分かった。

空気過剰率 $\lambda = 1.67$ における、火炎伝播の様子をシュリーレン計測によって観察したものを Fig. 10 に示す。画像より、レーザー点火は火炎が全体に広がらず、ある程度火炎が伝播した後、伝播速度が低下している。一方、LBALDI においては、全体に火炎伝播している様子が見られ、初期の火炎核形成からその後の伝播が速く、明らかに他の手法と異なる

点火挙動を示した。

最後に、スパーク放電点火、レーザー点火そしてLBALDIの点火確率を比較した。それぞれの投入エネルギーをTable 2に示す。すべての点火手法において点火エネルギーは全体で40mJになるように揃えて行った。Fig. 11に各点火手法における点火確率100%の時の上限空気過剰率の比較を示す。Fig. 11よりLBALDIが最も希薄条件において高い点火性能を示すことが分かった。

4 結言

- (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) 高気圧条件下においても、LBALDIによる放電しきい値電圧の低下が観察された。
- (3) 点火実験からLBALDIは、レーザー点火、スパーク放電点火よりも、より希薄条件において高い燃焼性能を示すことが可能であることがわかった。
- (4) メタン/空気予混合気における燃焼実験を行った結果、投入エネルギー73mJ時の空気過剰率 $\lambda = 1.67$ における圧力履歴の図から、両手法とも点火確率が100%であっても、熱発生率に違いが見られた。
- (5) 燃焼実験及びシュリーレン画像からLBALDIは初期火炎核が大きく、そのため高い点火性能を有することが示された。

5 参考文献

- (1) 「レーザー誘起型火花放電点火装置」 特開2009-97427

Table 1 Each ignition energy is 73mJ

Method	Laser energy	Discharge energy
Laser ignition	73[mJ]	0[mJ]
LBALDI	33[mJ]	40[mJ]

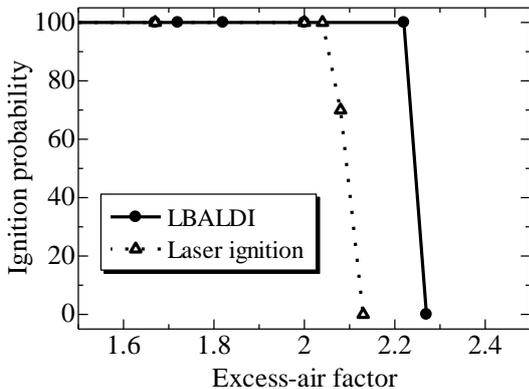


Fig. 8 Ignition probability vs excess-air factor

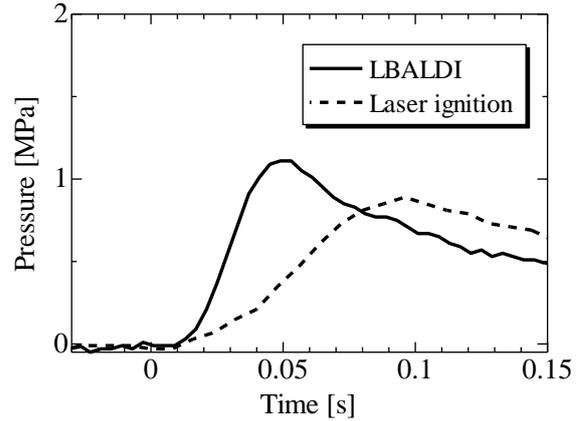
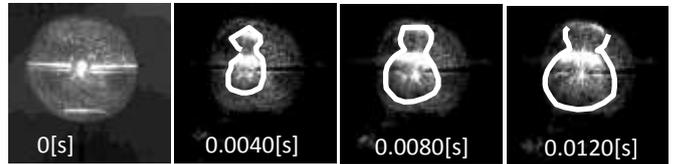


Fig. 9 Pressure history of excess-air factor ($\lambda = 1.67$)

Laser ignition



LBALDI

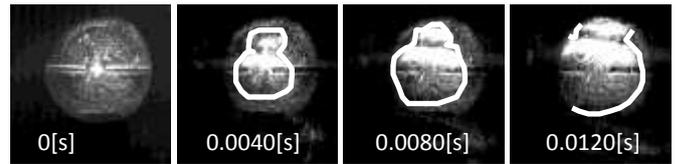


Fig. 10 Image of schlieren for laser ignition and LBALDI($\lambda = 1.67$)

Table 2 Each ignition energy is 40mJ

Method	Laser energy	Discharge energy
Spark ignition	0 [mJ]	40[mJ]
Laser ignition	40[mJ]	0[mJ]
LBALDI	15[mJ]	25[mJ]

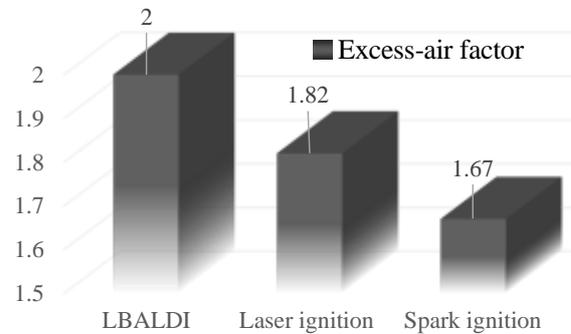


Fig. 11 Comparison of excess-air factor limit (Ignition probability=100%)