

レーザーブレイクダウン支援火花放電点火(LBALDI)の 燃焼特性に及ぼす燃料の影響

日大生産工(院) ○坂本 隼

日大生産工 岩田 和也 今村 幸 大熊 康典 山崎 博司 秋濱 一弘
産総研 古谷 博秀 高橋 栄一

1 緒言

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来ている。その対策として、希薄燃焼、高過給運転、燃焼室内に排ガスを再循環させるEGRの大量導入、燃焼室内にスワール流やタンブル流を生成し燃焼を促進させる筒内流動場の活用などの技術が挙げられる。そのひとつである希薄燃焼技術により、熱効率の向上やNO_xなどの有害な排気ガスの低減が期待される。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、これまで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行われてきた [1,2]。

一方、レーザーによる誘雷実験やレーザートリガースパークギャップスイッチなどのように、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、点火装置への応用が検討されていた[3]。著者らは、電極間に高電圧を印加するとともに、レーザーを用いてその電極間にブレイクダウンプラズマを生成することにより長尺放電を可能にした新しい体積的な点火技術として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)を提案し、開発を行ってきた[3]。

これまで、本手法によるメタン予混合気の希薄点火限界の拡大、さらに高速空気流動中でもつなぎ替えの少ない伸長放電路が形成できることを示した[2]。これらの結果は筒内に高流動を有するガソリンエンジンに本手法を適用

した場合に高い点火性能を期待できるものである。

一方、燃料の違いに関する検証は行っていない。点火過程に大きな影響を与えるルイス数は希薄ガソリン予混合気において2程度であり、初期火炎核サイズが大きいことが好ましい。長尺放電の形成によって初期火炎核のサイズを大きくできる本手法は、より高い点火性能を有する可能性がある。そこで、本報告では、メタン予混合気とプロパン予混合気の点火確率の当量比依存性や燃焼特性を調べた。

2 実験装置および方法

実験では、火花点火、レーザー点火、そしてLBALDIの3方式による点火実験を行った。Fig.1に実験装置概略図を示す。石英窓を絶縁物として保持した電極(直径3mm)を対向させて配置した。Nd:YAGレーザーパルス(波長532nm, パルス幅7ns)を凸レンズ(焦点距離 $f=100\text{mm}$)により電極間に集光し、レーザーブレイクダウンプラズマを形成した。本プラズマは、葉巻状の形状を有するため、レーザーをFig.1に示すように電極の斜め方向から入射させて、葉巻形状の長軸方向を電極に平行とすることで長尺の放電を安定に形成した。電極形状は、レーザー光が電極を照射することによるプラズマ形成を避けるように先端を尖らせた。燃料には、メタン(純度99.5%)及びプロパン(純度99.5%)を用い、定容容器内の予混合気充填圧力は0.1MPaとした。

火花放電では、一般に使用されているイグニッションコイル(DENSO製90919-02244)複数個を並列に接続して用いた。本実験条件である電極間距離、点火エネルギーをそれぞれTable 1, Table 2に示す。LBALDI実験における電極間距離は、レーザーが電極に当たらない最小距離8mmとした。LBALDI用のレーザー

The influence of fuel on ignition characteristics
by laser breakdown assisted long-distance discharge ignition(LBALDI)
Shun SAKAMOTO, Kazuya IWATA, Osamu IMAMURA,
Yasunori OHKUMA, Hiroshi YAMASAKI, Hirohide FURUTANI,
Eiichi TAKAHASHI, and Kazuhiro AKIHAMA

入射と放電用電圧印加の時間差を Δt と定義し、Fig.2にそのタイミングチャートを示す。本研究では、先行研究[4]にて最も長尺放電が可能となった火花コイルの容量成分の高電圧タイミングにレーザー入射時刻を合わせ、 $\Delta t = 11\mu\text{s}$ とした。火花点火については、電極間距離を1mmとした。放電エネルギーは、オシロスコープにより取得した電流波形と電圧波形から算出した。プラズマによって吸収されたレーザーエネルギーは、定容容器を真空排気した状態とガス充填時の透過エネルギーを差し引いて算出した。

点火の有無は、観測時間帯において圧力履歴の変化から判定した。点火確率は、同当量比にて10回の試行に基づき算出した。LBALDIではエネルギーをレーザー22mJ、放電44mJとした。これにより、総合エネルギーを66mJに統一して、火花点火とLBALDI実験、および33mJの火花点火とレーザー点火実験の比較を行った。

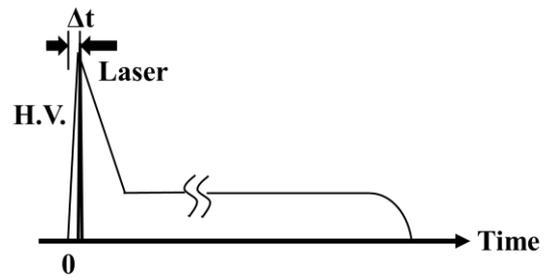
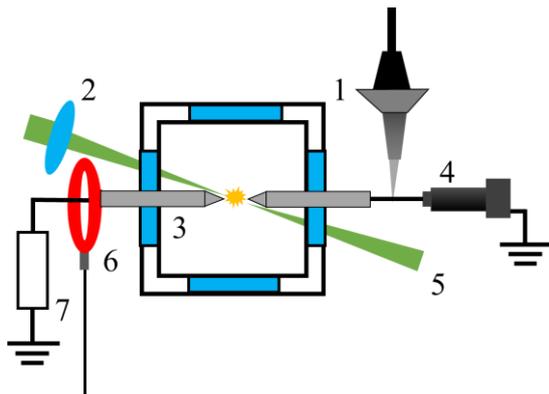


Fig.2 Timing of laser and high voltage application

Table 2 Each ignition energy

method	graph legend	Laser energy	Discharge energy
Spark ignition	SI;33mJ	0mJ	33mJ
Spark ignition	SI;44mJ	0mJ	44mJ
Spark ignition	SI;66mJ	0mJ	66mJ
Laser ignition	LI;33mJ	33mJ	0mJ
LBALDI	LBALDI;(22+44)mJ	22mJ	44mJ



1. Constant volume vessel, 2. Lens, 3. Electrodes, 4. Ignition coil, 5. HV probe, 6. Current probe, 7. Resistor

Fig.1 Experimental setup

Table 1 Each Electrode gap

method	graph legend	Electrode gap
Spark ignition	SI;33mJ	1mm
Spark ignition	SI;44mJ	1mm
Spark ignition	SI;66mJ	1mm
Laser ignition	LI;33mJ	8mm
LBALDI	LBALDI;(22+44)mJ	8mm

3 実験結果および考察

メタン、およびプロパン予混合気に対する、火花点火、レーザー点火、LBALDIの点火確率の当量比依存性をそれぞれFig.3, Fig.4に示す。まずメタン予混合気の希薄側において、LBALDIが最も希薄点火限界が広く、火花点火、レーザー点火は、あまり限界に差は無かった。また、LBALDIと他の点火方法の希薄点火限界の当量比の差は0.02であった。一方、プロパン予混合気の希薄側では、レーザー点火の点火確率100%となる当量比は $\phi=0.574$ に留まっていることに対し、LBALDIは、当量比 $\phi=0.520$ まで点火確率が100%の領域を拡大している。この様にLBALDIは希薄プロパン予混合気において顕著な効果を示した。

次に過濃側では、メタン予混合気においてレーザーやスパーク点火の点火限界に大きな差は見られないが、LBALDIは顕著な点火領域の拡大を示した。逆にプロパン予混合気ではLBALDIよりもむしろ今回用いた最大の火花点火エネルギーである66mJが最も過濃側の点火限界が広がる結果を得た。

この様にメタン予混合気の過濃側、プロパン予混合気の希薄側において、LBALDIが、レーザー点火、火花点火に比べ、点火限界の拡大効果が大きい結果が得られた。レイス数は希薄プロパン予混合気と過濃メタン予混合気において1より大きく、LBALDIはその両者に対して

顕著な拡大効果を示した。特に点火エネルギーを揃えた火花点火66mJとLBALDIを比較してこの傾向が見られたことから、LBALDIによって形成される大きな初期火炎核サイズの影響が考えられる。一方、電極への熱損失の無いレーザー一点火が同じ投入エネルギーの火花点火に対して必ずしも点火限界が広くない結果は、レーザーブレイクダウンの形成する流動の影響も考えられる。

次にLBALDIとレーザー一点火、火花点火と2者ないし、3者が点火確率100%の当量比の条件であるメタン予混合気とプロパン予混合気において圧力履歴の比較を行った。Fig.5, Fig.6にそれぞれメタン予混合気の当量比 $\phi = 0.493, 1.47$ 、プロパン予混合気の当量比 $\phi = 0.596, 2.35$ の圧力履歴を示す。この観測開始時間を時間軸の0秒とし、0.1秒において点火が行われている。メタン予混合気では、希薄、過濃側ともLBALDIがレーザー一点火、火花点火に比べ、圧力上昇率、到達圧が最も高いことが分かる。また、プロパン予混合気では、希薄側の当量比 $\phi=0.596$ でLBALDIとレーザー一点火の圧力履歴には、ほぼ差が見られなかったが、当量比 $\phi=2.35$ において、LBALDIが火花点火に比べ、圧力上昇率、到達圧が最も高くなる結果を得た。これらはいずれもLBALDIにより燃焼期間の短縮や高い燃焼割合の実現を示しており、大きな初期火炎核サイズを形成できることが点火方法として優れていることを示していると考えられる。

最後に、プロパン予混合気、当量比 $\phi=0.596$ における火炎伝播の様子をシュリーレン法により可視化したものをFig.7に示す。撮影速度は、30000fpsである。Fig.7より、火花点火、レーザー一点火に比べ、LBALDIは、初期の火炎核生成からその後の火炎伝播速度が速く、他者と異なる点火挙動を示していることが分かる。また、レーザー一点火の $t=333\mu\text{s}$ の画像を見ると非対称な渦対の形成に起因するサードローブと呼ばれる吹き出しがレーザー入射方向に形成されていることがわかる。一方、LBALDIでは同時刻の画像からわかる様に顕著なサードローブによる火炎の吹き出し構造の形成が抑制されている。これは、LBALDIではレーザーブレイクダウンの形成に加え、火花放電によるプラズマ形成を行っており、初期プラズマの温度圧力分布がレーザーブレイクダウンプラズマとは異なったため、抑制されたものとみられる。この様にLBALDI法では他手法に比べ、初期火炎核が大きいことが確認できた。

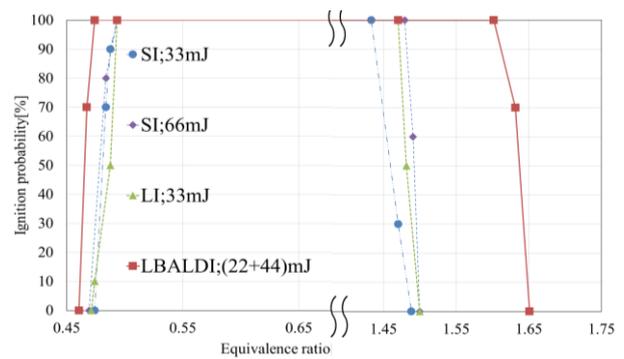


Fig.3 Ignition probability vs equivalence ratio in mixture of methane/air at 0.1MPa

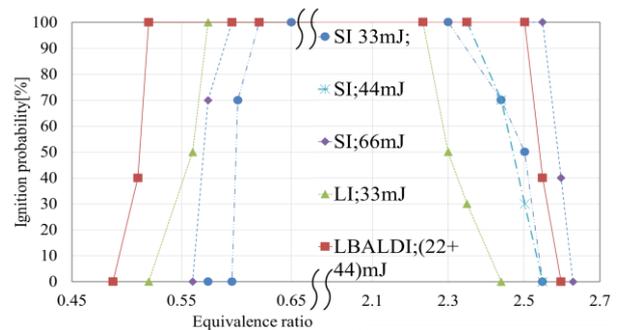


Fig.4 Ignition probability vs equivalence ratio in mixture of propane/air at 0.1MPa

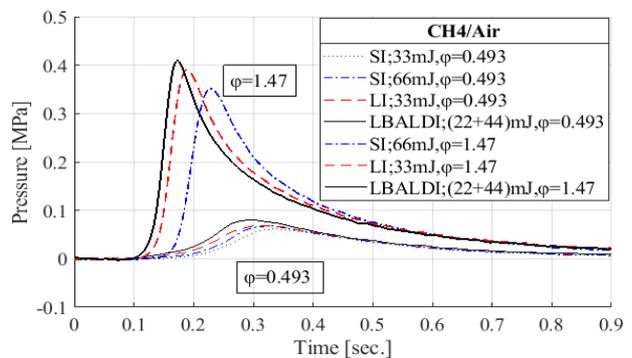


Fig.5 Pressure histories in mixture of methane/air

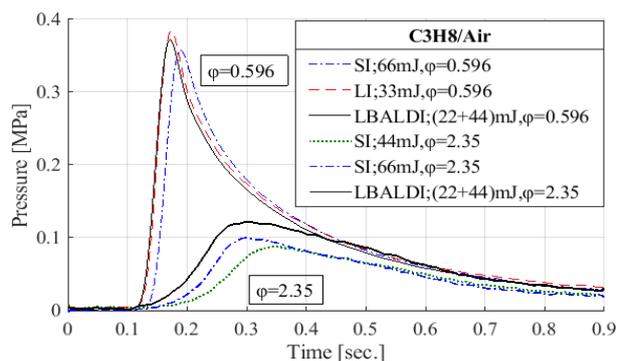


Fig.6 Pressure histories in mixture of propane/air

4 結言

長尺放電を形成して体積的な点火を実現するレーザーブレイクダウン支援火花放電法 (LBALDI) において、燃焼特性に及ぼす燃料の影響を調べた。メタン及びプロパンを用い、点火確率の当量比依存性をLBALDI、レーザー点火、火花点火の3方式を比較した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) LBALDIの点火限界の拡大効果は、プロパン希薄予混合気、および過濃メタン予混合気において顕著であることが分かった。
- (2) これらはレイス数が1より大きな混合気に対応するため、LBALDIにより形成される大きな初期火炎サイズの点火向上効果への寄与

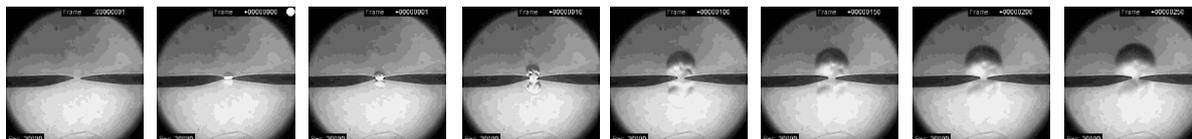
が示唆された。

- (3) LBALDIは燃焼の圧力履歴においてメタン、プロパン予混合気の希薄、過濃側のいずれにおいても他の点火手法よりも最も早い燃焼を示したことも、同手法の特徴である大きな初期火炎サイズ形成能力の寄与と考えられる。

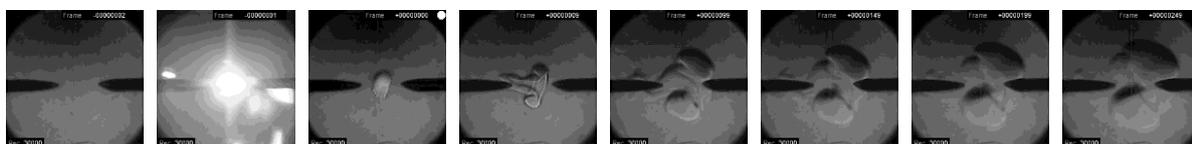
5 参考文献

- 1) Briggs, T., Alger, T., and Mangold, B., "Advanced Ignition Systems Evaluations for High-Dilution SI Engines" 7(4):20113
- 2) Zhang, A.,Cung, K.,Lee,S.-Y.,Naber, J.,Huberts, G.,Czekala, M., and Qu,Q., "The Impact of Spark Discharge Pattern on Flame Initiation in a Turbulent Lean and Dilute Mixture in a Pressurized Combustion Vessel," SAE Tech. Pap.201312-01-1627, 201312, doi:10.4271/201312-01-1627
- 3) Fukumi, Y., Imamura, O., Akihama, K., Takahashi, E., and Furutani, H., SAE Technical Paper, 2015-01-1897
- 4) 「レーザー誘起型火花放電点火装置」特開 2009-97427,(2009).

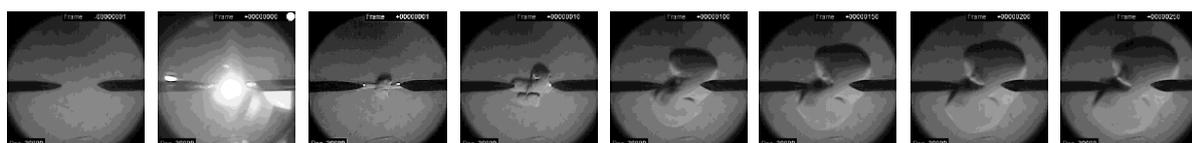
Spark ignition;66mJ



Laser ignition;33mJ



LBALDI;(22+44)mJ



t=0μs t=33.3μs t=333μs t=3.33ms t=5.00ms t=6.67ms t=8.33ms

Fig.7 Schlieren images for initial flame kernel of Spark ignition, Laser ignition, LBALDI in mixture of propane/air $\phi=0.596$