

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03992

研究課題名(和文) レーザーブレイクダウン支援長距離火花放電による広域点火に関する研究

研究課題名(英文) Study on volumetric ignition using laser breakdown-assisted long-distance discharge

研究代表者

秋濱 一弘 (AKIHAMA, Kazuhiro)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：30394547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：火花点火ガソリンエンジンの希薄燃焼限界を向上させる新しい広域点火法を提案した。レーザーブレイクダウンと高電圧印加を組み合わせた長距離放電点火LBALDI (Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition) の基礎特性明確化と有効性実証を目的としている。レーザーと高電圧印加の角度は90°付近が最も放電距離が長くなる。定容容器を用いて燃料依存性を調査しLewis数1以上の条件にて有効な点火法であることが分かった。急速圧縮装置を用いてエンジンに近い条件の高圧場においても長距離放電可能なLBALDIの有効性を実証し、目標を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、長距離放電の形成とそれによる広域点火を実証し、レーザーブレイクダウン支援長距離火花放電という新しい放電形態を用いる点で独創的であり、革新的な新点火方法が提案された。エンジンの燃費向上とクリーン排気の実現でき、特に高効率期待できる高過給・高EGR・希薄燃焼エンジンに有効と考えられ、二酸化炭素削減など社会的にも大きな意義を持つ。放電閾値電圧の低下のメリットを生かし、電極摩耗が問題のスパークプラグに代わる次世代点火法として、特に耐久性を重要視する定置型、あるいは船舶用エンジンへの応用も期待できる。またアンモニアなどカーボンニュートラル燃料の点火へも応用でき、本技術の波及効果は大きい。

研究成果の概要(英文)：We proposed new volumetric ignition method called as “LBALDI (Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition)” to improve the lean burn limit of a spark-ignition gasoline engine. The purpose is to clarify the fundamental characteristics and demonstrate the effectiveness of LBALDI that combines laser breakdown and high voltage application. The discharge distance is the longest when the angle between the laser and the high voltage application is around 90°. The fuel dependence was investigated using a constant volume vessel, and it was found that LBALDI is an effective ignition method for the fuel/air mixture with Lewis number larger than unity. Using a rapid compression machine, we also demonstrated the effectiveness of LBALDI even in a high-pressure conditions similar to an engine. The purpose of this research has been achieved.

研究分野：熱工学

キーワード：点火 火花点火エンジン レーザー レーザーブレイクダウン 燃焼 プラズマ 希薄燃焼 放電

1. 研究開始当初の背景

ハイブリット自動車が普及する中、従来の内燃機関の低燃費化が再び重要視され、欧州に続き日本においてもダウンサイズ、高過給エンジンの研究が盛んに行われている。内閣府 SIP「革新的燃焼技術」においても熱効率 50%を目指してスーパーリーンバーンの研究・開発が行われている。エンジン燃焼の性能向上には、燃焼状態を左右する点火自体が重要であり、具体的には初期火炎核を大きくすることで、より薄い混合気での運転、あるいは急速な燃焼が実現され、一層の燃費向上が実現できる。しかし、ガソリンエンジンの点火方式は、エンジンが発明されて以来 100 年もの間、スパークプラグ放電による点火、すなわち点に近い小体積放電による“点状”の点火が用いられている。その点状の点火方式の燃焼性能限界をブレイクスルーするために、近年、様々な研究がなされている。広域点火(体積点火)を目指したマイクロ波放電やコロナ放電を利用した方法が試みられているが、エンジン筒内の高圧場では放電領域が縮小し狙い通りの広域点火は実現していない。このように広域点火技術は特に高過給・高 E G R・高希薄燃焼のエンジン性能向上の重要なキー技術となっており、その実現が強く要望されている。一方、例えば前記内閣府 SIP における点火の研究は従来のスパークプラグをベースに放電エネルギーを増加するに留まっているのが現状である。このように広域放電はその実現が望まれているが世界的に見ても研究例、実現例が少ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、火花点火ガソリンエンジンの希薄燃焼限界などに代表される燃焼性能を大幅に向上させる広域・同時点火方法(体積的点火)の実現を目的としている。レーザー誘雷のように、レーザー誘起ブレイクダウンをトリガーとして長距離放電を形成させ、放電路に沿った“線状”あるいは“筒状”の広域火花点火を実現させる(レーザーブレイクダウン支援長距離火花放電点火)。本手法を、LBALDI (Laser Breakdown Assisted Long-distance Discharge Ignition) と呼んでいる。この広域点火により、従来のスパークプラグのような点状の点火の限界をブレイクスルーし、初期火炎核のサイズを飛躍的に大きくすることで点火性能の大幅改善に貢献することが狙いである。一方、レーザーブレイクダウン支援長距離火花放電のメカニズムと制御法は不明な点が多い。またその点火燃焼特性も未知である。

そこで本研究の第 1 の目的は、希薄混合気点火における LBALDI の広域点火の有効性を定容容器を用いて明確にする事である。また重要な基礎特性として燃料依存性も明らかにすることも目的としている。

次に、LBALDI における放電電圧印加方向とレーザー照射方向との角度依存性は詳しく分かっていない。レーザーブレイクダウンで発生する衝撃波やプラズマ成長方向と高電圧印加方向の最適化によって、さらなる長距離放電が期待できる。そこで本研究の第 2 の目的は、レーザーと高電圧印加の角度が放電距離に及ぼす影響を明らかにすることである。

さらに本研究の第 3 の目的は、急速圧縮装置を用いて点火実験を行い、エンジンに近い高圧場にて LBALDI による点火の有効性を実証する事である。

3. 研究の方法

3.1 定容容器を用いた LBALDI の点火特性とその燃料依存性の測定 [1]

図 1 に実験装置を示す。定容容器に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)を電極軸の斜め方向(30°)から入射し、凸レンズ(焦点距離 $f=100\text{mm}$)により電極間中心に集光してレーザーブレイクダウンプラズマを形成した。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ために先端を尖らせた。電極距離は、従来の SI 点火では 1mm、LBALDI の場合は 8mm の長距離放電とした。火炎面の観察には高速度シュリーレン撮影を用いた。すべての石英窓の直径は 5cm で、定容容器の容積は 150cm^3 である。点火実験では、点火方式毎の放電エネルギーを制御するため 3 個の点火コイルを用いた。2 個のコイルは SI 点火、残り 1 個は LBALDI に用いた。高電圧印加の前にレーザーを入射しプラズマを生成させるとスパーク放電開始

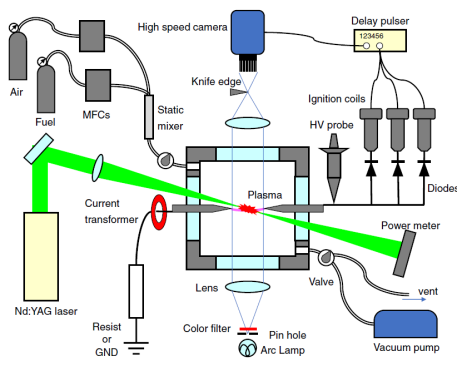


Fig.1 : Experimental setup for ignition in constant volume vessel.

電圧が低下することが既に分かっており[2]、今回は $11\mu\text{s}$ 前とした。放電エネルギー及び抵抗の消費エネルギーは電流および電圧波形から算出した。レーザーブレイクダウン生成によるレーザーエネルギーの吸収量は、真空（ブレイクダウン無し）及び空気1気圧充填時（ブレイクダウン有）におけるレーザー透過エネルギーの差から求めた。なお本実験では 9mJ/pulse の吸収量であった。放電のための全投入エネルギーは 60mJ とし、SI および LBALDI 実験で同一として両者を比較した。燃料にはレイス数の異なるメタンとプロパンを用いた。定容容器を真空排気後、予混合ガスを大気圧充填し、室温にて点火実験を実施した。点火の有無は、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回の試行により求めた。

3.2 レーザーと電場印加の角度が放電距離に及ぼす影響調査

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（ $f=150\text{mm}$ ）で集光して空気/大気圧において放電電極間にブレイクダウンプラズマを生成させた。レーザー光の照射角度は、プラグ電極を設置した回転ステージを用いて設定した（図2）。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： $\sim 32\text{kV}$ ）を印加した。本実験における電極間への電圧印加タイミングは、レーザー光照射開始時刻から $50\mu\text{s}$ 後とした。レーザー光の照射角度を接地側の電極から $40^\circ \sim 140^\circ$ に設定した LBALDI の放電を行い、電極間距離 D と放電確率の角度依存性を調べた。

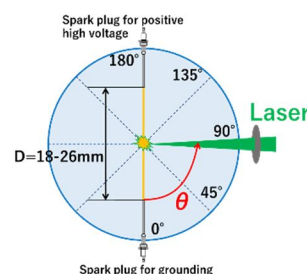


Fig.2 : Rotating stage

3.3 急速圧縮装置を用いた LBALDI の点火の可能性検討

図3に圧縮比5.9の急速圧縮装置（RCM）[3]における点火実験系を示す。2つのイグニッションコイルを並列に設置し、ステンレス電極の間隔は 3.9mm で、その中央にレーザーブレイクダウンを形成した。なお、従来のスパーク点火（SI）時は電極間隔を 1mm とした。図4は燃焼室断面である。石英窓を絶縁物として使い、2本の電極を挿入している。燃料にはイソオクタンを用い、予混合気をRCMに充填後、 1200rpm 相当の上死点到達速度で圧縮して点火した。レーザーは、高電圧印加の $20\mu\text{s}$ 前に照射した。筒内の指圧を計測し、LBALDI、SI、及びレーザー点火の3種類の点火方式を比較した。

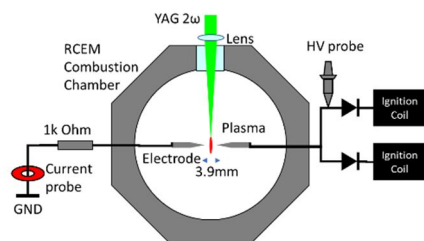


Fig.3 : Experimental setup for ignition in RCM.

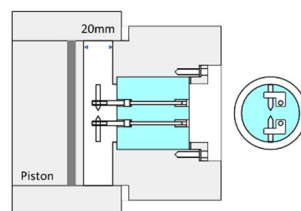


Fig.4 : Cross section of RCM combustion chamber.

4. 研究成果

4.1 定容容器を用いた LBALDI の点火特性とその燃料依存性

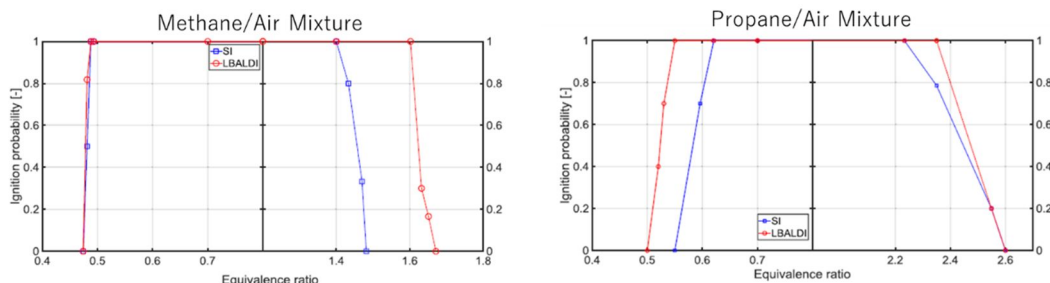


Fig.5 : Equivalence ratio dependence of ignition probability.

図 5 はメタンとプロパンにおける当量比と点火確率の関係を示す。メタン過濃側とプロパン希薄側はルイス数が 1 より大きい。ルイス数 > 1 において点火直後の曲率の小さい火炎では、物質が輸送によって反応帯に流入することと比較して反応帯から熱が輸送されることの方が支配的となり、火炎が弱められる[4]。すなわち、火炎曲率が大きい LBALDI の広域点火が有利となり、図 5 は前記を実証している。図 6 は火炎核形成の高速シュリーレン観察結果である。LBALDI の火炎核成長が早い様子が分かる。また図 7 は図 6 のプロパン / 空気希薄予混合火炎像から、火炎の大きさと伝播速度を求めた結果である。特に広域点火によって火炎の曲率大きい LBALDI の初期火炎核形成と伝播の速度が大きい。以上の結果から LBALDI の広域点火の有効性と燃料依存性が大気圧下での点火において実証され、本研究の第 1 の目的が達成された。

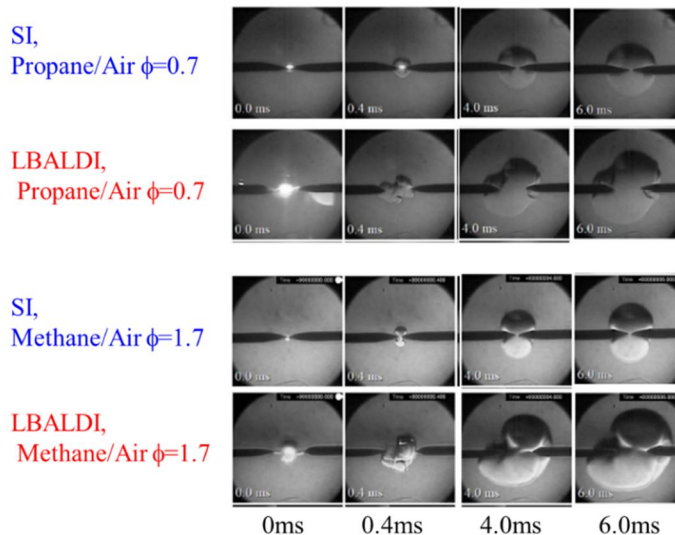


Fig.6 : Schlieren images of the flame for SI and LBALDI in propane/air mixture of $\phi = 0.7$.

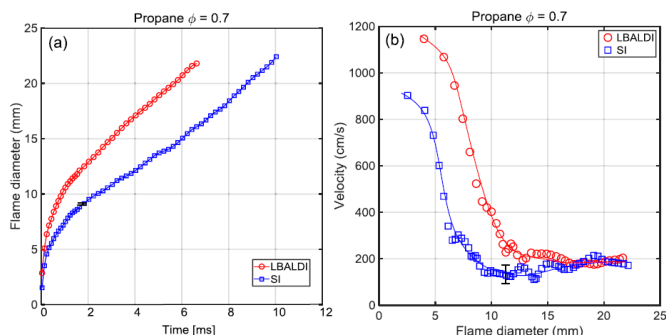


Fig.7 : Temporal flame diameter development and flame front velocity versus diameter for lean propane-air mixture.

4.2 レーザーと電場印加の角度が放電距離に及ぼす影響

図 8 にレーザーと電場印加の角度と放電確率 50% 時の電極間距離 D の関係を示す。電極への電圧印加のみの放電では電極間距離が 19.1mm であったが、レーザー光を照射することで放電距離が長くなった。また、レーザーエネルギーが大きくなるにつれて、放電距離がより長くなることから、LBALDI はレーザーエネルギーの値に強く影響を受けることが示唆された。さらに、LBALDI において、レーザー光照射角度が放電電圧印加方向と垂直 (90°) よりも、やや高圧電極側から照射した方が放電距離が長くなる傾向がありレーザー光照射角度の依存性が示唆された

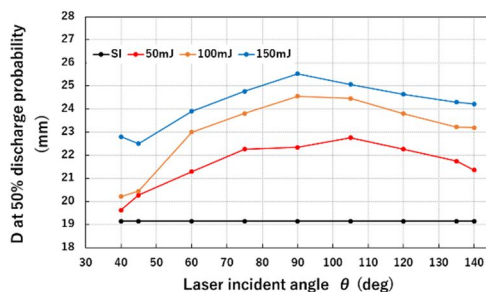


Fig.8 : Laser incident angle dependence of D at 50% discharge probability.

が、90°付近が概ね適していることも分かった。これらの結果は、レーザーブレイクダウンによる衝撃波生成[5]や衝撃波後方の高温・低密度領域の流動の非対称性が影響しているものと推察される。以上のように、レーザーと高電圧印加の角度が放電距離に及ぼす影響が明らかになり、本研究の第2の目的が達成された。

4.3 急速圧縮装置を用いたLBALDIの点火の可能性実証

実証実験では、圧縮前の初期圧力 0.1MPa、50 における高圧において点火を試みた。混合気の当量比は 0.5 で、点火が困難な条件を選定している。図 9 は RCM によって約 1MPa まで圧縮された予混合気に点火（圧縮開始から 40ms 後）した圧力履歴である。実験は 2 回行い、図には全ての結果をプロットしている。赤線で示す LBALDI は他の点火方法に比べて明らかに圧力の立ち上がりが早く、点火性能が優れていることが分かる。特に初期火炎伝播速度が速く、4.1 節で示した定容容器の結果と傾向が一致する。LBALDI において高電圧印加をしないレーザー点火では、失火するケースもあり、レーザーブレイクダウンによる長距離スパーク放電が点火特性改善に大きく寄与していることが分かる。以上の結果から、エンジンに近い高圧場にて LBALDI 点火の有効性が実証され、本研究の第3の目的は達成された。

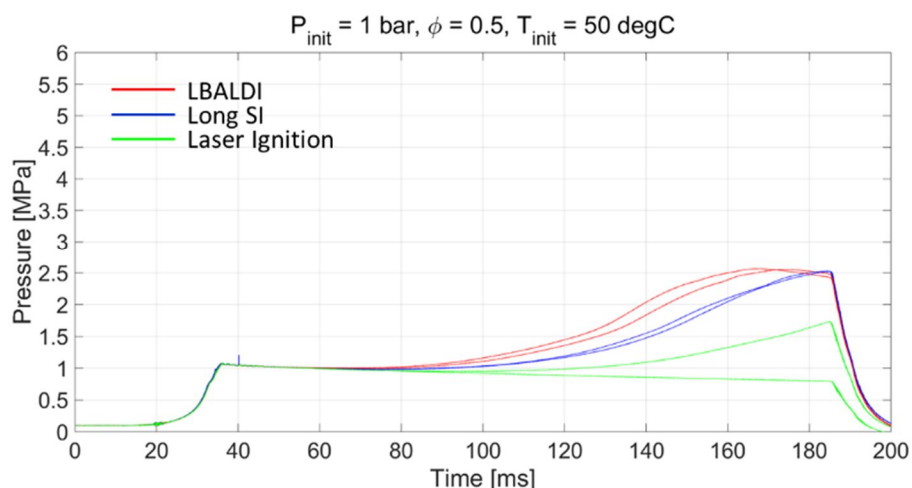


Fig.9 : Pressure histories of LBALDI, SI, and laser ignition.

< 引用文献 >

- [1] E.Takahashi, S.Sakamoto, O.Imamura, Y.Ohkuma, H.Yamasaki, H.Furutani and K.Akihama, Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition, Journal of Physics D: Applied Physics, 52, 485501(2019).
- [2] 福見侑也, 高橋 栄一, 古谷 博秀, 今村 宰, 秋濱 一弘, レーザーブレイクダウン支援火花放電(LBALDI)に関する研究(第1報)-放電及び点火の基礎特性-,自動車技術会論文集,Vol.47, No.1, 75 - 80 (2016) .
- [3] E.Takahashi, H. Kojima, and H. Furutani, Control of pressure increase rate in compression ignition by pulsed plasma irradiation, Japanese Journal of Applied Physics, 54, 01AG03 (2015).
- [4] 小林ほか, 低レイス数予混合気の可燃限界に関する包括的理解に向けて, Int. J. Microgravity Sci. Appl., Vol. 31 No. 2, 85-91 (2014)
- [5] 遠藤, レーザー誘起ブレイクダウンの物理とそれがもたらす点火特性, 日本燃焼学会誌, Vol.59, No.189, 172-183 (2017) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Takahashi Eiichi, Sakamoto Shun, Imamura Osamu, Ohkuma Yasunori, Yamasaki Hiroshi, Furutani Hirohide, Akihama Kazuhiro | 4. 巻 52 |
| 2. 論文標題 Fundamental characteristics of laser breakdown assisted long distance discharge ignition | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 485501 ~ 485501 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab39af | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 齊藤佑哉, 今村宰, 大熊康典, 山崎博司, 秋濱一弘 |
| 2. 発表標題 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 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂本隼, 岩田和也, 今村宰, 大熊康典, 山崎博司, 古谷博秀, 高橋栄一, 秋濱一弘 |
| 2. 発表標題 レーザーブレイクダウン支援火花放電点火(LBALDI)の点火特性に対する燃料の影響 |
| 3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shun Sakamoto, Takaki Ikemoto, Kazuya Iwata, Osamu Imamura, Yasunori Ohkuma, Hiroshi Yamasaki, Kazuhiro Akihama, Hirohide Furutani, Eiichi Takahashi |
| 2. 発表標題 Effect of discharge lengths on combustion characteristics in laser breakdown-assisted long-distance discharge ignition |
| 3. 学会等名 The 6th Laser Ignition Conference (LIC'18) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|---|----------------------------------|---------------|
| 研究 分 担 者 | 岩田 和也 (Iwata Kazuya) (40803953) | 日本大学・生産工学部・助手 (32665) | 2019年6月13日 削除 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|