

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06197

研究課題名(和文) レーザー光による燃料噴霧直接点火手法の確立～プラズマからの火炎核形成機構の解明～

研究課題名(英文) Study of direct ignition method for fuel spray using laser-induced breakdown plasma

研究代表者

瀬尾 健彦 (Takehiko, Seo)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：00432526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光を用いて燃料噴霧へ確実に点火するためには、その点火メカニズムを明らかにする必要がある。本研究では点火位置周りの燃料液滴の粒径や密度、また液滴の挙動が点火の可否に影響を及ぼしていると考え調査を行った。その結果、燃料液滴粒径や燃料液滴密度などが点火の成否に及ぼす影響は確認できなかった。レーザー点火においてはドーナツ状の高温領域が形成されることが知られているが、このような流れが生じた場合に点火が失敗している傾向にあった。噴霧に点火する場合、この流れを能動的に制御する必要があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー点火は空間中で集光させプラズマを生成させ点火させる方法であるが、比較的大きなエネルギーが必要になる短所がある。燃料噴霧をターゲットとした場合には、そのエネルギーを下げる事ができる。今回、点火位置における流れが点火の可能性に影響を及ぼしていることが分かった。この流れは燃料液滴とレーザー光の干渉によって生じるものである。今後は燃料液滴との干渉効果を調査し、これをコントロールすることで確実に点火できる点火システムが構築できると考える。

研究成果の概要(英文)：In order to reliably ignite the fuel spray using laser beam, it is necessary to clarify the ignition mechanism in the fuel spray. In this study, we considered that the fuel droplet size and density of the fuel droplets around the ignition position and the behavior of the droplets affect the propriety of ignition. As a result, the effects of fuel droplet size and density on the success or failure of ignition could not be confirmed. It is known that a donut-shaped high temperature area is formed in laser-induced breakdown ignition, but ignition tends to fail when such a flow occurs. It was found that this flow needs to be actively controlled when the spray is ignited.

研究分野：燃焼工学

キーワード：熱工学 燃焼 プラズマ利用

1. 研究開始当初の背景

運輸部門において化石燃料の利用を極力抑えるような燃料電池やハイブリッド車といった次世代自動車の普及が望まれている。しかし、それらの次世代自動車ですら多くは内燃機関を主動力源としており、2030年ですら80%程度は内燃機関に依存すると考えられている(次世代自動車戦略研究会(2010/04/12))。環境対策には内燃機関の燃費性能向上が重要であるといえ、2030年を目処にガソリンエンジン(以降SI機関とする)の熱効率最大50%を目指して研究が進められてきている(SIP 革新的燃焼技術)。近年では様々な技術によって35%程度まで熱効率は向上してきたが、熱効率50%実現には革新的な燃焼技術がなくては成し得ない。このような新燃焼技術として、作動流体の比熱比を大きくとれるスーパーリーンバーン(ガソリン希薄燃焼)が有望視されている。しかし、現状の火花点火装置では空間的なエネルギー密度が低く安定した点火が得られないことから、安定した点火手法の確立は最重要課題の一つである。

2. 研究の目的

近年、内燃機関の燃費性能向上にむけて、新たな点火手法の確立の重要性が高まっている。本研究では新たな点火手法として噴霧液滴を利用したレーザー光による点火を考える。この手法では燃料濃度の濃い液滴周りで点火の契機となるプラズマが生成されるために、筒内の空気比が高い場合でも確実に点火ができると考えられる。しかし、プラズマから火炎核生成に至るプロセスは明らかになっていない。そこで本研究では、燃料噴霧を対象とし μs オーダーの高速な現象である火炎核生成に対して高度光学計測と数値解析を適用し、噴霧液滴近傍における火炎核形成メカニズムを明らかにすることで、噴霧中におけるレーザー点火機構の解明を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

火炎核形成は液滴周りにある最適な燃料蒸気濃度の領域でプラズマによる高温領域が形成されることにより行われると考えられ、燃料蒸気濃度分布およびプラズマの成長と緩和現象を同時に調査する必要がある。本研究では、超音波ネブライザで生成された予混合噴霧流を用いて再現性の高い実験を行うことで現象を理解する。

- (1) プラズマによって液滴周りに形成される高温領域の形成特性を把握することを行う。また、この高温領域に存在する噴霧液滴の特性を調査する。
- (2) 揮発性の低い燃料を用いて、高温領域に形成される予混合気の燃料濃度に関するモデル化を数値計算と合わせて行う。

4. 研究成果

まず(2)に関しては、デカンを用いて着火実験を行ったが、ほとんど着火させることができなかった。当初はデカン液滴の周囲には常温で当量比が0.1程度の予混合気しか形成されないことから、プラズマによる高温場での燃料濃度計測に適していると考えていた。着火が困難であったことから、レーザー着火においてもプラズマの形成前に可燃性予混合気形成されていなければならない、プラズマによる燃料液滴の蒸発などはそれほど考える必要はないことが分かった。よって以降は(1)に関してのみ示す。

シュリーレン法による着火成功と失火の時系列画像より、プラズマの大きさや初期の火炎核の形状などは着火と失火で大きく異なる点はみられなかった。失火の場合では、ある一定の大きさまで成長はするが、その後成長が止まる傾向にあった。着火の成功または失火を調査するために、時系列画像から火炎直径の時間履歴を調べた。火炎の直径は、レーザーの入射方向に直交する長さとして定義した。得られた火炎直径の時系列を図1に示す。マーカーは、それぞれ着火の成功と失敗を表している。着火成功の場合は火炎径が大きくなり続け、失敗の場合は火炎直径が一定値に近づくことが確認できる。

図2は、バックライト画像で観察された特徴的な液滴の挙動を示している。(a)の青い点線は火炎面(高温領域)と見なされる領域であり、小さな液滴が押し出されることによって識別できる。これは、高温領域が膨張することによって押し出された微小液滴が

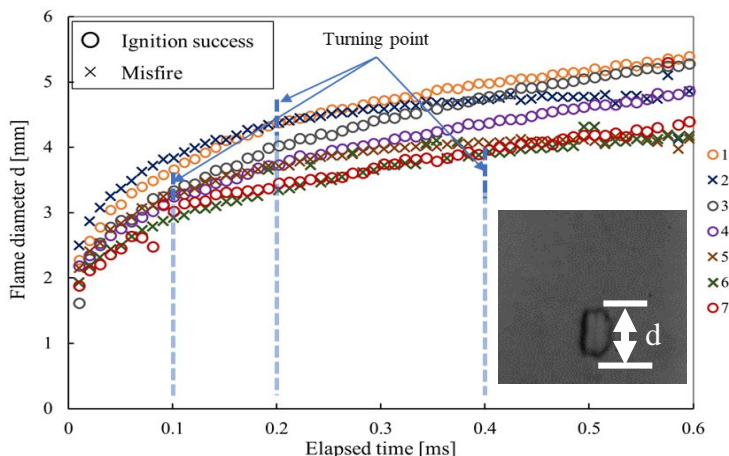


図1 火炎直径の時間履歴

存在することを示している．番号が付けられた液滴は，膨張が進むにつれて液滴が小さくなることを示している．一部の液滴は2つまたは3つの液滴に分裂することが観察されたが，他の液滴は(b)に示すように液滴形状が変形するのみのものも見られた．しかしこれらの現象は，着火の成否に関係なく観察された．

レーザー光軸を含む噴霧の縦断面における液滴挙動のみをレーザーシートを用いて可視化した．着火の成否に関わらず，高温領域内に液滴の散乱光が確認でき，押し出されないもしくは蒸発しきれない液滴が存在していることが分かる．Pedro M. de Oliveira ら(1)の報告によれば着火モードには3種類のモードがあるとされている．中でも火炎近傍の小さな液滴は伝播火炎によって押し出されながら蒸発し，大きな液滴は火炎面を貫通し，火炎内部で燃料蒸気を形成するような挙動となるモードを

液滴間伝播モードと言い，今回の結果は液滴間伝播モードであるといえる．また，火炎を貫通する液滴の存在によって局所的な消炎が起こる可能性が述べられており，着火失敗時の一部から蒸発が進まず液滴が流れ込むような挙動は，火炎面を貫通した大きな液滴によるものであることが考えられる．また，着火成功時には，高温領域は集光位置を中心に放射状に広がっていくが，失火時には，レーザー入射方向に対して垂直方向に分裂し火炎中心部に液滴が流れ込んでいる傾向にあることが分かった．レーザーシート断面にて分裂していく様子は立体的に考えると，高温領域が中心部に空洞のあるドーナツ状となっていることを意味している．液滴の蒸発した領域は時間の経過とともに中心部から離れていくため，ドーナツ状の火炎の直径は時間とともに広がっていき，中心部に流れ込む液滴は増加していく．流れ込んだ液滴により火炎中心部が冷却され着火失敗となると考える．着火成功時にも中心部に向かって流れていく液滴の発光は確認できるが，高温領域に侵入した直後に蒸発しているため，火炎中心部に到達する液滴は残らず，中心部の冷却は起こらないため着火に至ると考える．気体を対象としたレーザー着火においては，サードローブと呼ばれる流れが誘起され，高温領域がドーナツ状となることが知られている．しかし，噴霧においてはサードローブが生じない場合があり，その際着火確率が上がるような傾向が見られた．この原因が何に起因するものなのかわかっていないが，噴霧中におけるレーザー着火を考える場合，着火点近傍における流れを制御することが重要なファクターであることが分かった．

上記の液滴直径は画像より読み取ったものである．今後様々なパターンを解析するうえで滴直径を自動的にかつ瞬時に算出することは重要である．そこで，算出プログラムの構築を行った．開発環境はPython3.8，画像処理ライブラリはOpenCV4.5.3，画像処理ソフトウェアはImageJを用いた．解析は，まずOpenCVを用いて，取得した画像に対してCanny法によりエッジ検出を行い，白黒反転処理を施した．また，エッジの場所を確認するため，エッジ検出し白黒反転処理を施した画像と元画像を合成した．次に，ImageJを用いてスケール設定，二値化を行った．また，画像中心に2mm角を計測領域とし液滴を検出した．最後に，ImageJによる検出結果から，検出された領域に合わせた楕円の主軸と副軸の長さを用いて，検出された液滴の面積を算出した．PDAにより既に噴霧特性の分かっているものを対象に画像解析を行い，統計処理をすることで解析方法の検証を行った．その結果，画像解析からは液滴径の大きなものが多く算出されることが分かった．この原因として，エッジ検出時の解析エラーが考えられる．一例として，被写界深度内の液滴と被写界深度外のぼやけた液滴がエッジ検出された後には1つの液滴として計算されており，このようなエッジ検出により元々の大きさよりも大きな液滴として検出される物が多くあることが分かった．そこで液滴周りのぼやけを取り除くノイズ処理を行うことで対応した．その結果，PDAで得られた液滴の粒度分布とほぼ同じ傾向の粒径分布を得ることに成功した．

参考文献

(1) Pedro M. de Oliveira, Epaminondas Mastorakos, “Mechanisms of flame propagation in jet fuel sprays as revealed by OH/fuel planar laser-induced fluorescence and OH chemiluminescence”, *Combustion and Flame*, 206, 308-321, (2019)

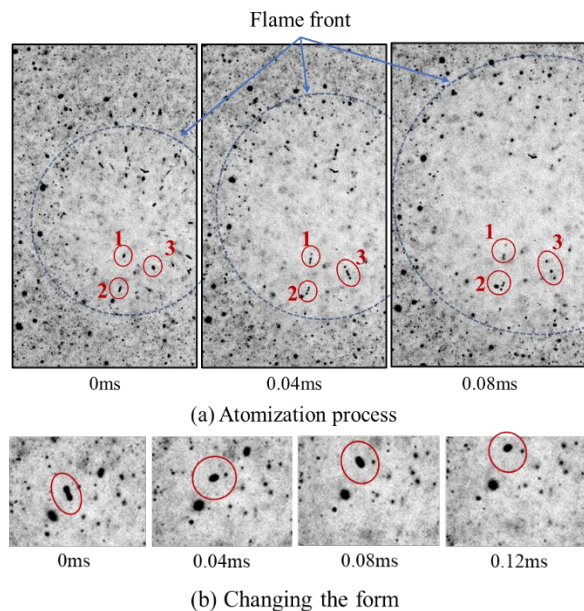


図2 液滴の挙動

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 1件）

1. 著者名 瀬尾 健彦、石村 祐宜、三上 真人	4. 巻 61
2. 論文標題 燃料噴霧中のレーザー励起ブレイクダウン着火に関する研究（第二報 燃料噴霧中でのレーザー励起ブレイクダウンおよび着火特性の調査）	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 142-148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20619/jcombsj.1805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yushi Saiki, Takehiko Seo and Masato Mikami
2. 発表標題 A study of the flame kernel formation by laser-induced breakdown ignition in ethanol spray
3. 学会等名 JCREN2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊木 勇志，瀬尾 健彦，三上 真人
2. 発表標題 燃料噴霧のレーザー着火における初期火炎核形成時の燃料液滴の挙動
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立石寛達，瀬尾健彦，三上真人
2. 発表標題 噴霧特性が燃料噴霧中のレーザー励起ブレイクダウン着火の着火可否に及ぼす影響
3. 学会等名 第26回微粒化シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 年岡 沙英, 瀬尾 健彦, 三上 真人
2. 発表標題 低圧雰囲気下でのレーザーによる噴霧着火に関する調査 : 画像解析による粒度分布の測定
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------