

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820062

研究課題名(和文) レーザー光を用いた燃料噴霧着火の物理的特性の解明と着火手法確立へのアプローチ

研究課題名(英文) Elucidation of the physical characteristics of Laser-induced ignition of the fuel spray and approach to establishment of an ignition method

研究代表者

瀬尾 健彦 (SE0, Takehiko)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00432526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光による着火手法の確立には燃料噴霧中におけるレーザー着火特性を十分に理解しておく必要がある。レーザー着火については、気体燃料を対象とした報告がほとんどであり、液体燃料について噴霧特性と着火特性が「定量的に評価」された報告はない。そこで、燃料噴霧中におけるレーザー着火特性の調査を行い、噴霧特性およびレーザー光の集光特性と着火特性を定量的に評価するとともに噴霧中におけるレーザー着火のメカニズムを明らかにすることを試みた。その結果、噴霧中では噴霧液滴により多数のプラズマの生成が確認され、さらにエタノール蒸気の場合と比べ低い入射エネルギーにもかかわらず多点での着火が可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Laser-induced ignition that is the non-contact ignition method is a promising technology for spark ignition engine. A lot of researches about laser-induced ignition and breakdown had been conducted. However, gas fuel such as methane were used in these researches. Considering an application to the SI engine, it is important to clarify the characteristics of ignition of liquid fuel spray and its mechanisms. Laser-induced breakdown and ignition of ethanol spray were studied using a high-pulse energy Nd:YAG laser. Schlieren image of flame kernels and plasma were taken by high-speed CMOS camera. Some flame kernels are formulated around plasma. The probabilities of the breakdown and ignition occurrence were determined. Based on these findings, the possibility of multi-point ignition of fuel spray with a low energy single-shot laser beam was suggested.

研究分野：燃焼工学

キーワード：熱機関 レーザー着火 噴霧 液滴 プラズマ

1. 研究開始当初の背景

内燃機関の燃費性能向上には、新たな燃焼促進方法の確立が重要となる。本研究では、新たな燃焼促進方法として燃料噴霧液滴を利用したレーザー多点着火手法の確立を考える。レーザー着火は、従来の火花点火方法と違い非接触な着火方法であり、電極による熱損失や火炎伝播の阻害を考慮しなくてもよいことや着火位置を任意に設定できるために燃焼器設計の自由度が上がるなどの利点を有している。レーザー着火は国内外において数多くの報告がなされてきているが、それらほとんどがメタン空気予混合気などの気体燃料を対象とした研究であり、液体燃料を対象とした研究はほとんど行われていないのが現状である。実際の内燃機関に用いられている液体燃料の噴霧中でのレーザー着火手法の確立には、噴霧中におけるレーザー着火特性の調査を行い、噴霧特性およびレーザー光の集光特性と着火特性を定量的に評価するとともに噴霧中におけるレーザー着火のメカニズムの解明が重要となる。

2. 研究の目的

レーザー光による着火手法の確立には燃料噴霧中におけるレーザー着火特性を十分に理解しておく必要がある。レーザー着火については、気体燃料を対象とした報告がほとんどであり、液体燃料について噴霧特性と着火特性が「定量的に評価」された報告はない。そこで、燃料噴霧中におけるレーザー着火特性の調査を行い、噴霧特性およびレーザー光の集光特性と着火特性を定量的に評価するとともに噴霧中におけるレーザー着火のメカニズムを明らかにすることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

燃料としてエタノールを用いた。単一径の液滴から構成される噴霧を形成しやすいことから、燃料噴霧の生成には超音波噴霧器を用いた。この噴霧器で生成された燃料噴霧をレーザー集光位置付近に空気中へ搬送し連続供給することにより可燃性の定常噴霧場を形成した。燃料噴霧液滴の数密度は PDPA を用いて計測を行った。レーザー光源には所有の Nd:YAG レーザー装置 ($\lambda=355\text{ nm}$, フィルタによる分離が容易なため) を、着火に必要な入射エネルギーの計測にはレーザー励起ブレイクダウン実験で用いたパワーメータを用いて行い、その成否はハイスピードカメラを用いた火炎の直接撮影により行った。レーザー装置は繰り返し発振回数 10Hz であることから、条件によっては前パルスで着火した影響が次パルスでの結果に影響が出る恐れがある。そこで、ナノ秒 YAG レーザー用ビームダンパーによりレーザー装置に負荷をかけることなく繰り返し発振回数を減らした。レーザー着火特性に影響を及ぼすとされるレーザー光空間プロファイルの調査には、ビー

ムプロファイラを用いた。燃料噴霧液滴数密度は、発生噴霧液滴径が変化する可能性を考慮して超音波噴霧器からの霧化量を一定とし搬送空気流速を変えることにより変化させた。レーザー光の集光特性は、レンズの焦点距離を一定として噴霧中でのレーザー光集光位置を変えることで変化させた。噴霧中におけるレーザー着火メカニズムの解明に向けた調査検討に関しては、高速度ビデオカメラを用いた燃料液滴とプラズマおよび火炎核の同時撮影により、噴霧中における火炎核の生成メカニズムの解明を試みた。

4. 研究成果

図 1 に異なる液滴数密度における入射エネルギーとプラズマの生成確率 (図 1(a)) および着火確率 (図 1(b)) の関係を示す。液滴数密度が増加すると、プラズマの生成確率はわずかではあるが上昇していた。一方、着火に関しては最も液滴数密度の低い条件である 18.9 mm^{-3} の噴霧において着火が起こりやすく、 9 mJ 程度の入射エネルギーで確実な着火が可能であることが確認できた。また、液滴数密度が増加するにつれて着火確率は下がる傾向にあった。この要因としてエタノール噴霧中の気相当量比の影響が考えられる。総当量比から噴霧中のエタノールの液相を除いた気相のみの当量比を検討した結果、液滴数密度の増加に伴い当量比は増加し、液滴数密度が 18.9 mm^{-3} の噴霧では希薄可燃限界以下、 23.4 mm^{-3} の噴霧では若干希薄、 26.6 mm^{-3} の噴霧で

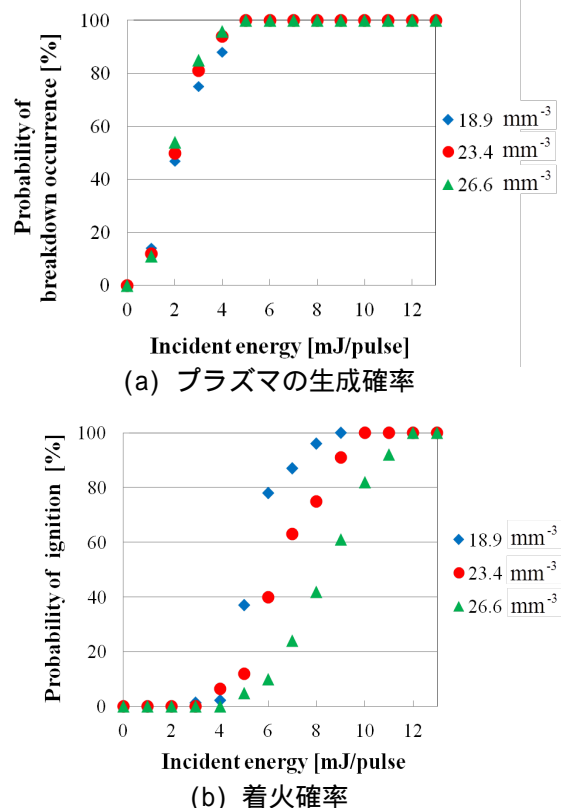


図 1 異なる液滴数密度における入射エネルギーとプラズマの生成確率および着火確率

は若干過濃となっていた．生成された火炎核の近傍に存在する液滴は火炎核からの熱を受けて蒸発し，周囲の燃料濃度が高くなると考えられる．液滴数密度が高い場合，気相の当量比が高いために火炎核の成長が阻害されると考えられる．さらに，火炎核の近傍に液滴が存在する可能性も高くなることから，このような現象が起こりやすくなり，着火確率も下がるのではないかと考えられる．

図 2 に液滴数密度 23.4 mm^{-3} 一定の噴霧において入射エネルギー 6 mJ で着火を行った際の火炎核成長過程を撮影した結果を 3 パルス分示す．撮影速度 18000 fps ，露光時間 $50 \mu\text{s}$ である．図中に示した時間はプラズマからのものと思われる白い発光を認めた時刻を $t = 0 \text{ ms}$ とした際の経過時間である．レーザー光は図の左側から照射しており，噴霧の中心（図中の破線）に集光されている．噴霧中では多点でプラズマが生成されており，その大きさはプラズマ毎に異なっていることが分かる．さらに，プラズマが生成される位置は 1 パルス毎に異なっており，焦点位置でも生成されない場合も見受けられた．また，どの時系列画像においても，噴霧中ではプラズマの生成の後，火炎核がそれぞれのプラズマの位置より形成され成長していく様子が確認できる．その後，多点でプラズマが生成された場合には，火炎は干渉しながら伝播していく様子が見てとれる．このように噴霧中ではランダムにプラズマが生成され，その大きさや位置は 1 パルス毎に異なることが報告されているが，火炎核の形成，成長についても生成されるプラズマにより 1 パルス毎に異なることが確認できた．プラズマについても，生成がすぐに火炎伝播につながるわけではなく，火炎伝播する途中で消滅する着火に寄与しないプラズマの存在や，合体して一つ火炎として伝播していく場合が存在することが分かった．

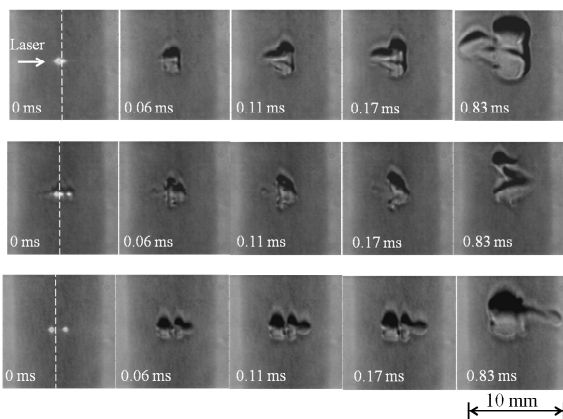
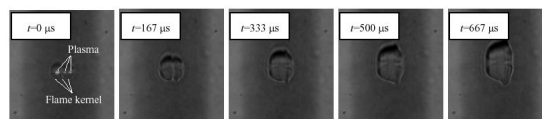


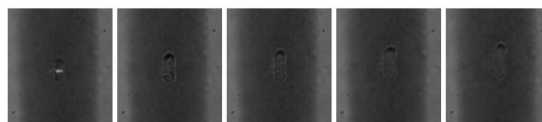
図 2 火炎核成長過程の例（数密度 23.4 mm^{-3} ）

図 3(a) に着火成功，(b) に着火失敗時の生成されたプラズマ及び火炎核成長過程の時系列画像を示す．入射エネルギーは 5 mJ であり，プラズマが画像に確認された時間を $0 \mu\text{s}$ と定義した．図 3(a) より，時刻 $t = 0 \mu\text{s}$ に

いて複数のプラズマが生成されていることが分かる．各プラズマの周りに密度差のある領域が形成されていることが見て取れる． $t = 167 \mu\text{s}$ において，それぞれの領域は結合し，一つの領域として拡大している．これらの領域は，燃料液滴の周りにおける可燃性予混合気の燃焼によって形成されるように見え，火炎核であると考えられる．一方，図 2(b) において， $t = 0 \mu\text{s}$ の画像に見られるように，着火が成功した場合と同様複数のプラズマが生成されている．しかし，密度差のある領域は流れ方向に延びており，各プラズマの周囲には形成されていないことがわかった．



(a) 着火成功



(b) 着火失敗

図 3 プラズマ及び火炎核成長過程

以上より，噴霧中では噴霧液滴により多数のプラズマが生成されることが分かった．それらのプラズマすべてが着火に寄与するわけではないが，条件によっては複数のプラズマによる多点着火が可能であることが分かった．さらにエタノール蒸気の場合と比べ低い入射エネルギーにもかかわらず着火が可能であることが分かった．

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) Takehiko Seo, Yuki Ishimura and Masato Mikami, A Study on Ignition Characteristics of Rich-Premixed Ethanol Spray by Laser-Induced Plasma, The 3rd Laser Ignition Conference ' 15, April 29, 2015, Argonne National Laboratory (Argonne, United States).
- (2) Takehiko Seo, Yuki Ishimura and Masato Mikami, Experimental study on Characteristics of laser-induced ignition of fuel rich premixed ethanol spray, The 2nd Laser Ignition Conference ' 14, April 24, 2014, Pacifico Yokohama (神奈川県横浜市).
- (3) 石村祐宜, 瀬尾健彦, 三上真人, エタノール噴霧濃度がレーザー着火に及ぼす影響, 第 22 回微粒化シンポジウム, 2013

- 年 12 月 20 日,長崎大学(長崎県長崎市).
(4) 瀬尾健彦,石村祐宜,三上真人,レーザー励起プラズマによる着火に及ぼすエタノール噴霧特性の影響,第 51 回燃焼シンポジウム,2013 年 12 月 6 日,大田区産業プラザ Pio(東京都大田区).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬尾 健彦 (SEO, Takehiko)
山口大学大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00432526

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：