



非定常噴霧におけるレーザ誘起プラズマによる着火特性

Ignition Characteristics in Transient Spray by Laser-Induced Plasma

河原 伸幸,
(Nobuyuki KAWAHARA)
岡山大学
(Okayama Univ.)

富田 栄二,
(Eiji TOMITA)
岡山大学
(Okayama Univ.)

中村 紳哉
(Shinya NAKAMURA)
岡山大学
(Okayama Univ.)

Laser ignition is an alternative technology of spark ignition. Recently, spray-guided engine which is a kind of a DISI engine attracts attention about improvement of thermal efficiency and environmental issues. The purpose of this research is to adapt laser ignition to the spray-guided system. To adapt laser ignition to transient spray, the optimum focal position, plasma generation process and shockwave interaction with fuel spray were investigated by high-speed visualization and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) method. Laser-induced plasma was generated by focusing a nanosecond pulse of second harmonic wave of Q-switched Nd:YAG laser. Plasma and flame generation at various laser focus position in fuel spray were recorded by high-speed cameras. LIBS measurement showed local fuel mixing inhomogeneity which agrees with laser-ignited flame images. The results observed from high-speed cameras showed that fuel droplets were effected on the position of the plasma generation. A shockwave was generated simultaneously with plasma blown away and dispersed the fuel droplets. The breakdown position changed to the laser incident direction when there was fuel spray. It is thought that the fuel droplets play role of lens.

Keywords: Laser Ignition, Laser-induced Plasma, LIBS, DISI Injector, Shockwave

1. はじめに

近年、環境問題や石油枯渇問題の深刻化に伴い、内燃機関においては低排出化および高効率化が求められている。それらを実現させる技術の一つとして、ガソリンエンジンにおいては筒内直噴点火方式(DISI方式)が挙げられる。特にインジェクタと点火プラグを近接して配置し、燃料噴霧近傍で着火を行うスプレーガイド方式の研究が注目されている。この方式では噴霧特性によって混合気を層状化するため希薄運転による熱効率の向上が見込め、二酸化炭素の排出量低減などが期待されている。また、ピストンヘッドへの燃料付着が少ないことから未燃炭化水素の排出を低減させることができる。一方で、スプレーガイド方式では点火プラグを燃料噴霧に近接させるため、プラグによる噴霧の貫徹阻害や点火源となるスパークと噴霧の干渉などにより燃焼にばらつきを生じるといった報告がある⁽¹⁾⁽²⁾。また、点火プラグの突き出しが大きいため発生するプラグ自身からの熱損失も考慮すべき課題である⁽³⁾。

上記の問題を解決する手法としてレーザ着火技術が挙げられる。レーザ着火とは、高エネルギー密度のパルスレーザを可燃性混合気に照射することで気体分子を解離・電離しプラズマを生成させ、これを熱源として火炎核を形成する技術である。レーザ着火は、着火位置や着火時期、着火エネルギーの制御が可能であり、非挿入であるため燃料噴霧の貫徹阻害や電極などによる熱損失が無く、また、光学系の選択により多点での着火が可能であるなど、従来の電氣的着火システムでは見られない多くの利点を有しており、様々な研究がなされている⁽⁴⁾⁽⁷⁾。一方で、燃料噴霧という気体と液体が混在しているような場合におけるレーザ着火技術の応用に関しては、燃

料噴霧とレーザの干渉に伴ってプラズマ生成位置が変位する可能性、最適なレーザ集光位置、プラズマ生成時に発生する衝撃波が噴霧形状に及ぼす影響、液滴によるレーザ光散乱およびエネルギーの減衰、最小着火エネルギーなどの詳細調査が必要である。本研究では非定常プラズマ生成過程から燃焼の様子を高速度カメラによって可視化し、プラズマや噴霧、燃焼の挙動を観測した。また、レーザ誘起ブレイクダウン分光(LIBS)法により、着火源となるプラズマの自発光を分光計測することで着火位置における燃料と雰囲気との関係を調べ、液滴の存在や衝撃波が LIBS 計測に与える影響を考察した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置概要

図1に本研究で用いた実験装置の概要を示す。四面に観測用の石英製光学窓(可視化域直径52mm)を有する定容容器の上蓋にDISI用2孔マルチホールインジェクタ⁽⁸⁾を一方の噴霧が垂直下向きに噴射するように設置した。燃料にはイソオクタンまたはエタノールを使用し、噴射された燃料噴霧に対してNd:YAGレーザの第二高調波(波長532nm, ビーム径8mm, パルス幅8ns)を集光した。このパルス幅はプラズマ生成の期間(数 μ sオーダ)に対し十分短く、生成したプラズマへの影響は少ないものと考えられる。レーザプロファイルの変化を防ぐためにフラッシュランプのエネルギーを一定とし、1/2波長板および偏光ビームスプリッタによって任意の入射エネルギーに調節を行った後、焦点距離100mmの集光レンズで集光し、噴霧中にプラズマを生成させた。そこから得られるプラズマの自発光を光ファイバ経由でICCD付分光器に導き、スペクトルを計測する。レーザのエネルギーは2基のエネルギーメータによって容器への入射光エネルギーとプラズマ生成および燃料噴霧の散乱を経た後の透過光エネルギーをそれぞれ

算出した。また、プラズマ生成位置の様子を最大撮影速度 1.25Mfps, 最小露光時間 100ns の超高速カラーカメラ (nac 社製 ULTRA cam HS-106E) により拡大撮影を行った。この時、燃料噴射圧を変更することで液滴径や流速を変化させ、プラズマの生成位置や噴霧の挙動を観測した。

容器内雰囲気には着火実験時には乾燥空気を、LIBS 計測時には窒素を 0.1MPa で充填した。容器はトラバース装置上に固定され、レーザ集光位置を変更することが可能である。集光位置の詳細を図 2 に示す。噴孔から噴霧軸下流 20mm の位置を集光点とし、水平方向に噴霧中心から順に 3 箇所を実験条件として選定した (図 2 中の点①~③)。点①を噴霧軸中心の 0mm とし、②, ③点はそれぞれ①点より 2.4mm, 4.8mm の位置である。

2.2 レーザ誘起ブレイクダウン分光 (LIBS) 法

LIBS(Laser-induced breakdown spectroscopy)法とは高エネルギーのレーザ光を観測対象に集光しプラズマを生成させ、その光を分光計測することによって原子または分子の発光を捉え成分検出を行う手法である⁹⁾。

図 3 に LIBS 法の成分検出原理を示す。通常、原子および分子は基底状態と呼ばれる化学的に安定な状態で存在している。そこへ、高エネルギーのレーザ光を集光すると、原子中の束縛電子はレーザ光のエネルギーを吸収し光電離を引き起こす。光電離によって生成した自由電子が周囲の原子と衝突することで、衝突された原子をさらに電離する。この過程によって十分な自由電子が生成されると、やがて絶縁破壊 (ブレイクダウン) に至る。このとき、プラズマが生成される (図中①)。生成されたプラズマは周囲からの冷却効果や衝突によるエネルギー損失により安定状態へ帰しようとする (図中②)。この過程で、電離状態にあった原子は基底状態へ戻る前に励起状態を経由する。この励起状態から基底状態へ戻る際に、式(1)に示されるエネルギー差 E に相当する光を放出する (図中③)。

$$E = h\nu \tag{1}$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は原子に固有の振動数である。放出される光の波長は原子ごとに異なり、この波長を分光計

測することで原子を特定することが可能となる (図中④)。また、燃料由来の原子 (例えば C, H など) と雰囲気由来の原子 (例えば N, O など) の発光強度比を取ることで燃料-空気混合比 (当量比, 空燃比) を見積もることができる。図 4 にその例を示す。図 4 は定容容器内に燃料 (イソオクタン) を噴射し、雰囲気温度を $T_a=430K$ まで上昇させて十分に蒸発を促した後に (すなわち、燃料と雰囲気が予混合状態となった後に) LIBS 計測を行った結果である。噴射量を変更することで任意の当量比の混合気を形成させて実験を行った。図 4 より燃料中の水素原子の発光 $H\alpha:656nm$ と雰囲気由来の窒素原子 $NI:501nm$ の発光強度比は、当量比 ϕ とほぼ線形関係にあることが分かる。

レーザ誘起プラズマを生成させるという点はレーザ着火と LIBS で共通しているため、一回のレーザ照射で LIBS 計測と着火を同時に行うことが可能となる。このため、プラズマの状態とそれに追従する燃焼状態を比較することができ、単独の非定常噴霧に対して当量比変化を表現したデータ取得が可能である。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ着火実験および LIBS 計測

図 5 にレーザ集光位置を変更した場合の燃焼画像を示す。燃料はイソオクタンであり、雰囲気温度は $T_a=430K$, レーザエネルギーは $E_{in}=90mJ$ 一定とした。燃料噴射期間は 0.37ms, レーザ照射時期は噴射開始から 2.85ms とした。レーザは画像の右側から入射しており、着火点から噴霧下流へ拡大する火炎を撮影した。画像上でブルーフレームあるいは輝炎が確認された場合を着火とみなした。なお、火炎を見やすくするために画像の輝度を調節している。画像上に表示した Q の値は容器内の圧力履歴より算出した熱発生量である。レーザ照射から 6ms にかけての火炎の画像を見ると、集光位置では点③が最も火炎の広がりが大きく、点②が最も小さい。熱発生量

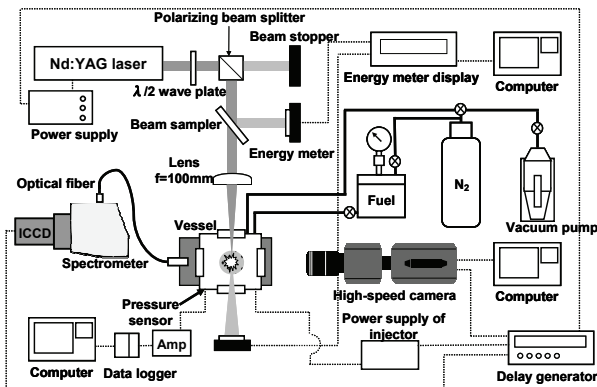


Fig.1 Experimental apparatus

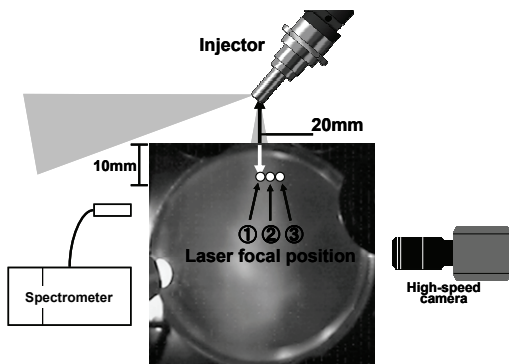


Fig.2 Measurement locations

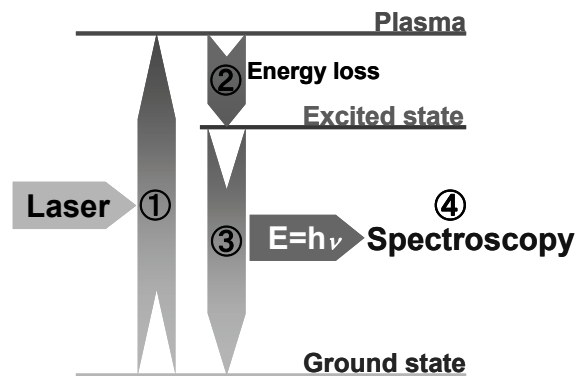


Fig.3 Principle of LIBS

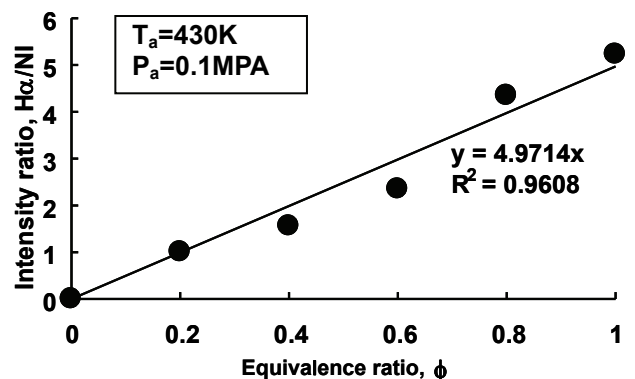
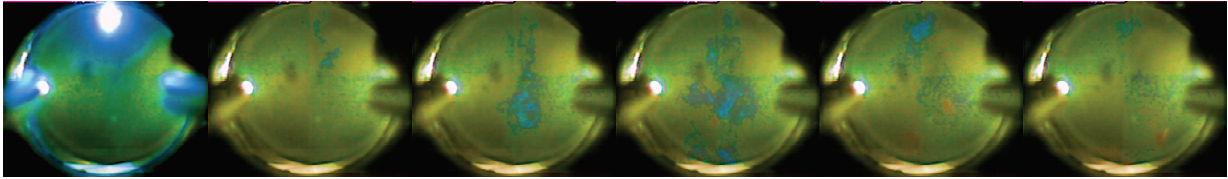
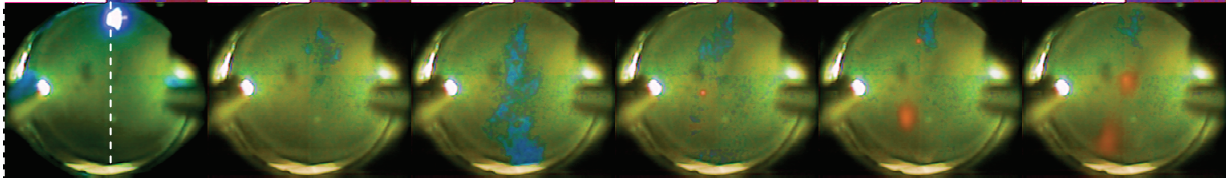


Fig.4 Relation between equivalence ratio and intensity ratio

Focal position ①, Q=21.4J



Focal position ②, Q=14.8J



Focal position ③, Q=84.7J

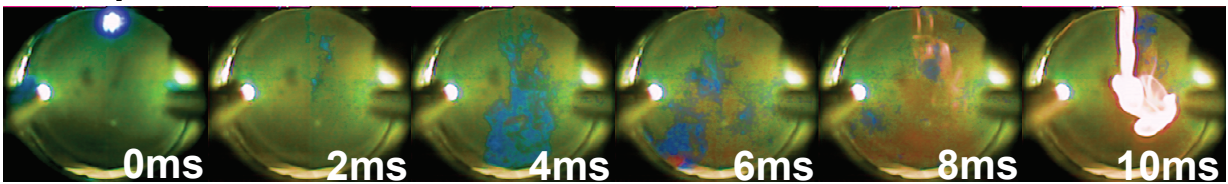


Fig. 5 Time-series of laser ignited flame image

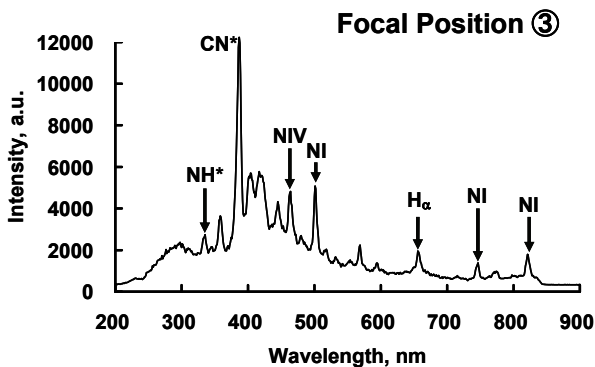
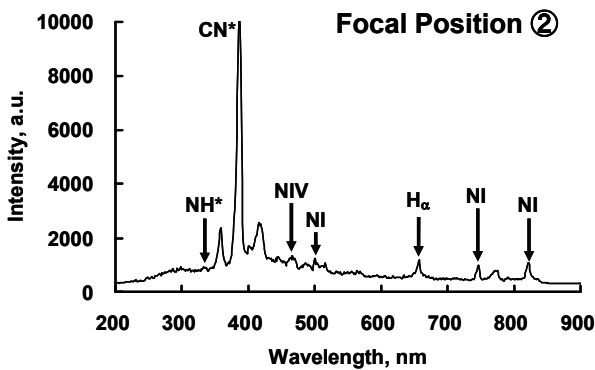
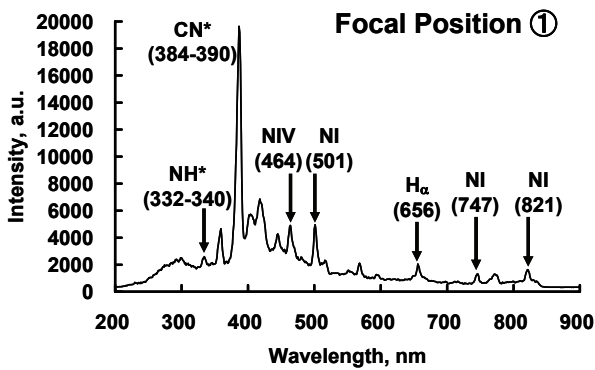


Fig. 6 LIBS spectrum at each focal position

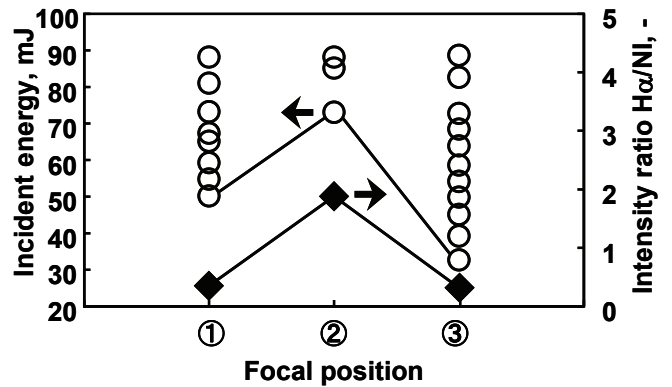


Fig.7 Ignition energy and Ha/Ni ratio

Q の値も集光点③では大きく、点②では小さくなっており火炎画像と同じ傾向を示している。酸化剤である酸素が多く分布していると予測される点③は着火性が良いが、熱発生量に着目すると点②よりも点①の方が大きく火炎の広がりも小さいことから、単に集光点が噴霧の外縁に接近するほど着火に適するというわけではなく、プラズマ生成位置に可燃混合気が存在するか否かという点が重要であると考えられる。このような傾向は、ばらつきはあるものの複数回の実験において一致しており、図5は代表例を示している。また、点③の10ms付近では輝炎が生成しているが、これは図2で示すように実験には2孔のインジェクタを用いており、火炎の拡大が大きかった点③ではもう一方の噴霧へ火炎が引火し、輝炎の発生に至ったものと考えられる。

そこで、プラズマ生成位置における雰囲気と燃料の混合度を考察するためにレーザー照射位置を変更した場合の各点における LIBS 計測の結果を図6に示す。グラフの横軸は光の波長、縦軸は発光強度を示している。分光のタイミングはレーザーの影響を抑えるために、レーザー照射から1μs後に露光を開始し、露光期間は50μsとした。雰囲気には窒素を用い、窒素の発光スペクトルと燃料中の水素および炭素の関連するスペクトルを比較する。図6を見ると、図5の結果で熱発生量の大きかった集光点③→①→②の順序で、窒素の原子発光

NI:501nm と NIV:464nm, 燃料中の炭素と雰囲気中の窒素の反応による CN*:384-390nm および水素と窒素の反応による NH*:332-340nm の発光が相対的に強いことが分かる。また CN*は着火から燃焼にかけて生成されるラジカルであることから, CN*が観測された集光位置では燃焼時と同様の反応が開始されていることが分かる。プラズマは撮影した画像上で青白く発光していることが確認されており, これは CN*の発光である 384-390nm の発光が顕著であるためと考えられる。一方で, H α :656nm にはそれほど変化が見られない。

図 7 に各集光点におけるレーザ入射エネルギーおよび図 6 より得られる原子発光の発光強度比 H α /NIを示す。図 7 中の入射エネルギーは, どの集光点でも着火が可能な E_{in}=90mJ の条件からレーザエネルギーを小さくしていき, 最終的に着火が確認できたエネルギーまでを○プロットにて示している。○プロットの最小値から, 図 5 において火炎の広がりや熱発生量が大きい集光点③では着火エネルギーが低く, 逆に熱発生量の小さな点②では着火に大きなエネルギーが必要なことが分かる。これには燃料と雰囲気中の混合状態が関連しており, インジェクタ固有の噴霧特性が影響するものと考えられる。

発光強度を求めるに当たり, スペクトルに含まれる背景光はシャリー法⁽¹⁰⁾を用いて減算した。図 7 の◆プロットより H α /NIの比が大きい点, すなわち雰囲気に対し燃料の混合量が多い点は点②→①→③の順であり, これは熱発生量や最小着火エネルギーの傾向と一致し, LIBS 計測は着火特性の評価として有効であるといえる。この結果から, 熱発生量の多かった集光位置では着火時期における燃料と雰囲気中の混合状態が適当であったため, 火炎核の形成から火炎伝播への移行が円滑に進み, 結果としてその後の燃焼が促進されたと考えられる。ただし, 最も燃料濃度が濃いとされる集光点②の発光強度比を図 4 に示す予混合気中の濃度推定式に適用させたとしても, 推定される当量比は $\phi=0.4$ 程度の希薄状態を示す。これは, 燃料噴霧中には液滴が存在しているために, 蒸気層のみを考慮した図 4 の推定式が成立していないものと考えられる。すなわち, 燃料噴霧という気相と液相が混在している状況では, 液滴が存在することでプラズマの状態が予混合気中に生成したプラズマ状態と異なるため, 当量比や空燃比を定量評価することが困難であり, 液滴とプラズマの関係についてより詳細な調査が必要である。また, 液滴の存在がプラズマの生成位置へ影響を与える可能性も観測された。図 5 の集光点②の画像上に破線で示した位置は観測位置から見た燃料噴霧の中心であり, 集光点は破線に重なる。一方で, レーザを燃料噴霧中心に集光しているにも関わらずプラズマ生成位置の中心がレーザ入射側へ大きく変位することが図 5 から確認できる。これは気相中でレーザ誘起プラズマを生成させた場合には見られない現象であるため, 液滴の存在がプラズマ生成位置に影響しているといえる。この現象に関しては, 液滴によるレンズ効果などが考察されている⁽¹¹⁾が, いまだ不明瞭な点が多い。着火位置が重要となる噴霧燃焼において, 集光位置と着火位置が一致しないことは考慮すべき項目である。同時に, プラズマ生成に伴って噴霧が飛散しているような状況も確認された。上記のように, 燃料液滴の存在はプラズマ生成位置や噴霧自身へ影響し, 定量的な LIBS 計測や着火位置の選定などを行う際に問題となる。そこで, 燃料噴霧とレーザ誘起プラズマの相互干渉を考察するために, 特にプラズマ生成位置に着目した超高速度拡大撮影を行った。次節にその結果を述べる。

3.2 噴霧中におけるプラズマ生成の観測

撮影速度 1Mfps, 露光時間 100ns, 200ns にてプラズマ生成位置付近の撮影を行った。高温雰囲気中では燃料液滴の蒸発によって液滴径が変化することが予想されるので, 沸点が低く蒸発を促進させやすい燃料としてエタノールを使用した。

撮影領域はおよそ 10.0mm×8.7mm である。燃料噴射圧を P_i=1, 3, 7MPa と変化させ, 液滴径と流速を変化させて実験を行った。噴射期間を 2ms, レーザは噴射開始から 1ms 後に照射した。図 8 に燃料噴射圧 P_i=1MPa, 雰囲気温度 T_a=296K の条件で観測された燃料噴霧中のプラズマ生成の様子を #1, #2 の 2 パターン示す。図 5 と同様にレーザは右方から入射しており, 画像の破線上にレンズの焦点が位置する。図 8 を見ると, #1 はレンズの焦点を中心にプラズマが生成しており, ひとつの塊となっている。レーザ照射後 4 μ s 程度から衝撃波が捉えられており, 衝撃波通過に伴い付近の液滴が飛散, 分裂している様子が見られる。これに対し, #2 の場合はレンズ焦点を中心に発生するプラズマとは別に, レーザ照射側にプラズマが 2 箇所発生していることが分かる。その各々で衝撃波が発生しており, 液滴の飛散も #1 と異なるものとなっている。また, 複数箇所ではプラズマが発生した場合は 1 箇所発生した場合に比べプラズマ発光の衰弱が早い。同量のレーザ入射エネルギーを投入したとき, 複数箇所ではプラズマが発生した場合はそのそれぞれに入射エネルギーが分散される。このためプラズマ発生 1 箇所あたりに消費されるエネルギー量は複数箇所ではプラズマが発生した方が小さくなり, 発光が弱くなったものと考えられる。図 9 は P_i=7MPa として雰囲気温度を変更した実験結果である。図 9 において雰囲気温度 T_a=296K の条件を同雰囲気温度の図 8 と比較すると, P_iの増加によって液滴径が小さくなっていることが分かる。また, 図 8 と比較してさらにレーザ照射側へプラズマ生成位置が変位していることが分かる。これは, 燃料噴射圧の上昇に伴って噴霧角が広がった結果, 噴霧とレーザ光が接触する位置がレーザ入射側へ移動したためだと考えられる。プラズマが複数箇所では生成する様子は図 8 とほぼ同様であるが, 液滴の飛散の様子は図 8 よりも大きい。T_a=390K まで雰囲気温度を上昇させると液滴の飛散はより顕著になった。T_a=390K はエタノールの沸点である 351K よりも高温のため蒸発過程にあり, 液滴径は蒸発により減少傾向にあると考えられる。このため, プラズマ生成時に発生する衝撃波の影響を受けやすくなり飛散の状況が強く表れたものと思われる。いずれの燃料噴射圧でも焦点位置よりレーザ入射側にプラズマ生成位置が偏る傾向が見られた。これはレーザのエネルギー密度が最大となるレンズの焦点より手前でブレイクダウンが発生していることを意味する。すなわち, 液滴が存在している場合には, その位置でブレイクダウンに必要なエネルギー量(ブレイクダウン閾値)が低下していることになる。この原因として考えられるのは, まず液相と気相の界面(つまり液滴界面)ではブレイクダウンが発生しやすいという可能性と, 液滴のレンズ効果によって局所的にエネルギー密度が増大しブレイクダウンに至っている可能性が挙げられる。一般に気相中でのブレイクダウン閾値は雰囲気が高圧になるにつれて減少することが知られている⁽¹²⁾。2.2 節で述べたように, ブレイクダウンに至るためには原子あるいは分子中の束縛電子がレーザエネルギーを吸収して初期自由電子となり, それが次々と周囲の原子や分子に雪崩的に衝突して行き自由電子を一定量以上生成する必要がある。雰囲気圧力を上昇させると気体分子の密度が上昇し電子の衝突確率が增大することから, 高圧雰囲気中ではブレイクダウン閾値が減少すると考えられている。液体は気体よりも高密度であるために, 初期電子さえ生成されればその後の衝突確率は気体よりも高いと考えられるので, 液滴が存在する位置では気相中よりもブレイクダウン閾値が低下することが予想される。実際に水中へレーザ光を集光した場合には, 空気中におけるブレイクダウン閾値のおよそ 1/10 程度のエネルギーでブレイクダウンに至るといった結果が別の実験より得られている。

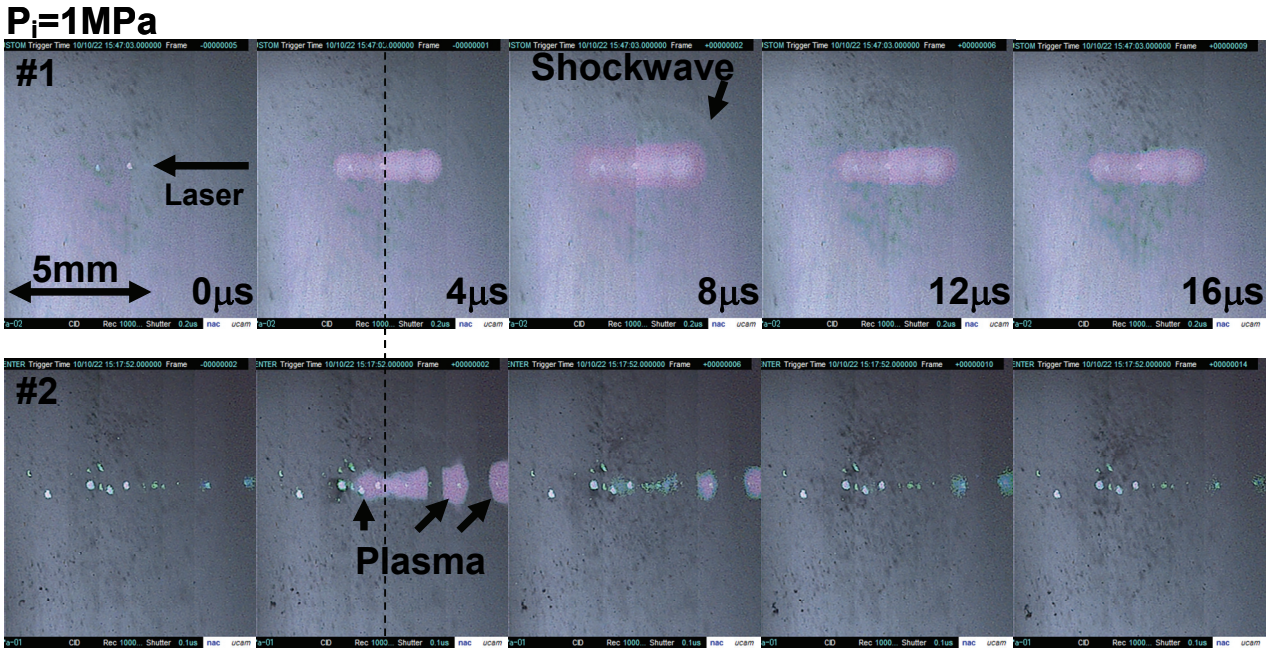


Fig.8 Time evolution of laser-induced plasma in fuel spray at $P_i=1\text{MPa}$

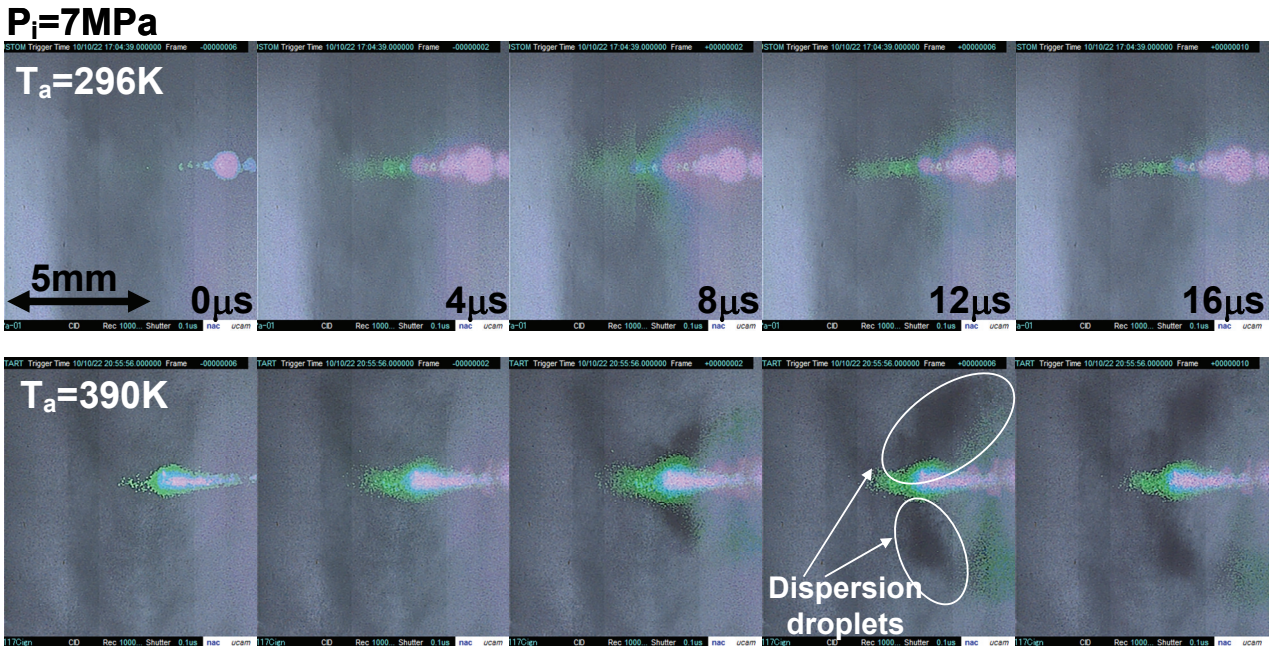


Fig.9 Time evolution of laser-induced plasma in fuel spray at $P_i=7\text{MPa}$, $T_a=296\text{K}$ and 390K

3.3 液滴のレンズ効果

液滴にレーザを集光した場合、液滴がレンズのような役目を担っており、集光位置が変化する可能性がある。そこで、液滴のレンズ効果を調査するため、超音波液滴浮揚装置⁽¹³⁾を用いて単一の水液滴に対しレーザ集光実験を行った。この装置では、ホーンから発せられた超音波(周波数 60kHz)の入射波が反射板で反射されホーンへ戻る機構となっており、反射の際に入射波と反射波によって定常波が形成される。この定常波は入射波と反射波の位相が約 90 度ずれているので超音波の波長 5.7281mm(室温 20°C)の半波長毎に液滴を浮揚させる力が発生する。通常、音波は縦波として媒質に伝わり、超音波が入射した媒質は膨張・圧縮領域が波長の長さに応じて繰返し分布している(音圧分布)。音圧分布の節に物体が存在するとき、超音波の進行方向へ物体を押しやる圧力(放射圧)が生じる。超音波を定常波にすることで、その節により強い放射圧を与えることができる。この装置を用いて浮揚させた約

2.5 から 3mm の単一液滴を、集光レンズの焦点を基点にレーザ光軸方向に移動させてレーザを照射し、高速度カメラで撮影した結果を図 10 に示す。液滴位置 $DP(\text{mm})$ はレンズの焦点位置と液滴中心の距離を示しており、レーザは画像右側から入射する。十字の記号は集光レンズの焦点位置である。 DP の値は液滴をレーザ入射側へ移動したときをマイナス、透過側をプラスとした。 $DP=1\text{mm}$ のとき、レーザはレンズの焦点を通過後に液滴に入射する。このため気相中で生成されたプラズマが液滴に接触する位置関係となるため、衝撃波により液滴はレーザ照射側から飛散していく。同時にこの条件は 3.2 節で述べた、自由電子が液滴に供給される状態と考えることができる。図 11 は $DP=1\text{mm}$ の条件において照明を落としてプラズマの発光のみを撮影した画像である。これを見ると、白線の円で囲んだ部分のように、液滴の界面に沿ってプラズマが生成していることが分かる。 $DP=-4\text{mm}$ のときはレンズの焦点よりレーザ側 4mm の位置に液滴が存在しているた

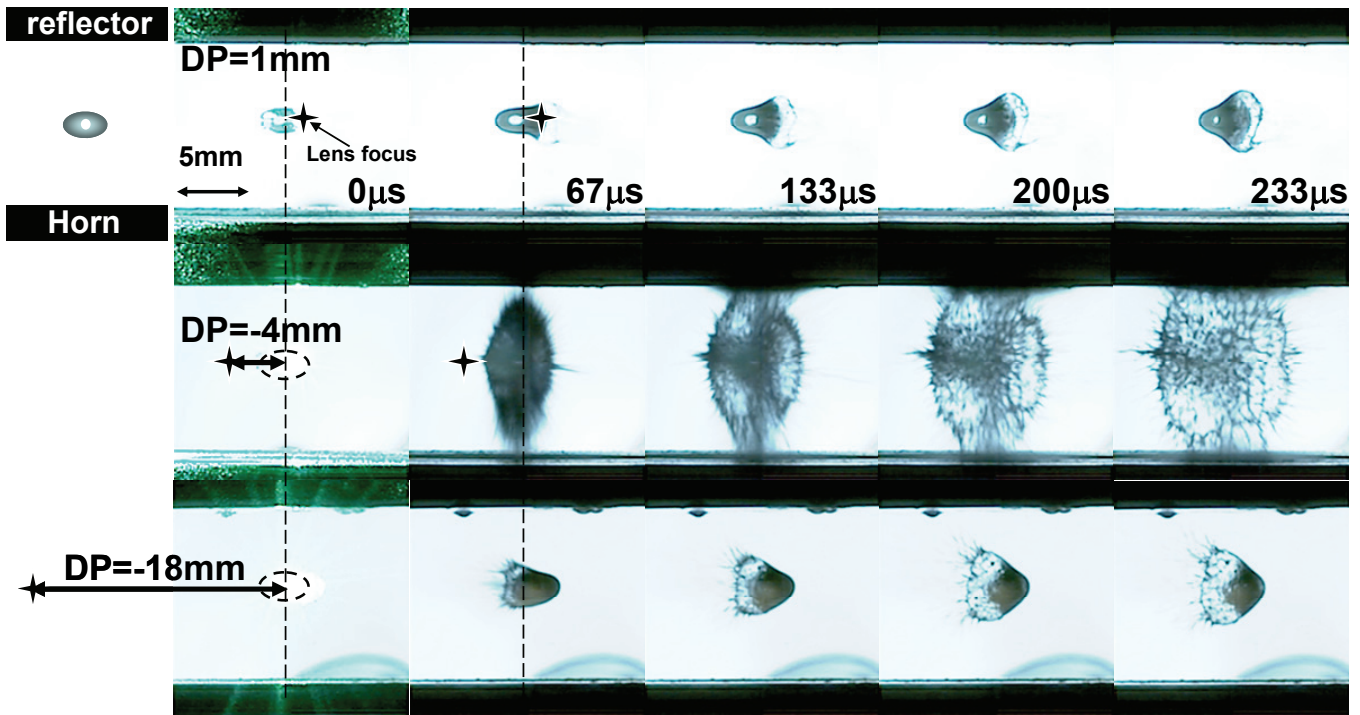


Fig.10 Droplet explosion at different location to lens focus

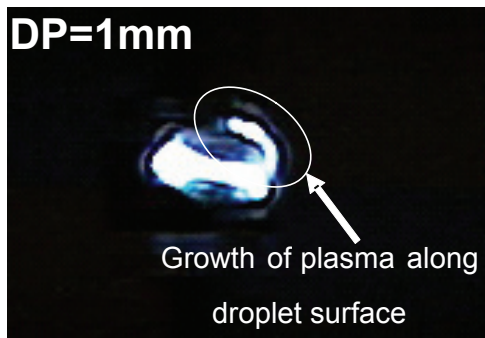


Fig. 11 Image of plasma grow along droplet surface

め、画像上ではレンズの焦点は液滴の左側に位置している。しかし、液滴は中心から外側へ均等に飛散している。このことから、液滴による光の屈折によって本来の集光レンズの焦点距離よりも短縮され、液滴内部で焦点を結び、ブレイクダウンに至ったものと考えられる。さらに移動量を増やし $DP=-18mm$ とした場合には、液滴は後方から飛散する。このことから、液滴の存在によって焦点距離が大きく短縮されていることが分かる。また、飛散の様子は $DP=-4mm$ の状況よりも $DP=1mm$ の状況に近く、画像から判断すると、液滴内部でのブレイクダウンであれば液滴中心より左方か、あるいはレーザー光が液滴を通過後に焦点を結んでいる可能性がある。燃料噴霧のように液滴が小さい場合、それに伴って液滴の焦点距離も減少する。図8や図9でレーザー入射側へプラズマ生成位置が変位した原因として、この液滴のレンズ効果による焦点距離の短縮が考えられる。単独の噴霧液滴がレンズの役割を担い、その各々の焦点位置でプラズマ生成に至ったとすれば、複数箇所プラズマが生成した理由についても説明することができる。

また、液滴のレンズ効果意外にも、燃料の蒸発によって蒸気層が生成し屈折率の変化が生じた結果、レーザーの焦点位置が変化する可能性も考えられるが、これに関しては蒸気層と液相を判別する手法により実験を行うなどして、さらなる考察を行う必要がある。

レーザー集光位置の変更に伴う燃焼の様子や局所の燃料混合度合いの調査を行い、着火源となるレーザー誘起プラズマの生成およびプラズマが燃料噴霧に与える影響を可視画像より考察し、以下の知見を得た。

- (1)非定常噴霧におけるレーザー着火では、着火位置によって燃焼の様子や熱発生量が大きく異なることが確認できた。また、噴霧の存在がプラズマ生成位置を変位させる可能性が示唆された。
- (2)LIBS 計測の結果では着火位置における原子発光と最小着火エネルギー、および着火に迫る燃焼状態に関連が見られ、局所の燃料と雰囲気との混合比率を求める指標と成り得ることが示された。
- (3)プラズマ生成に伴って発生する衝撃波によって、燃料液滴は飛散・分裂することが確認できた。
- (4)液滴界面に沿ったプラズマの生成や、液滴自身のレンズ効果によって本来のレンズ焦点よりも短縮された位置でブレイクダウンが発生する可能性が確認できた。

謝 辞

本研究を行うにあたり、超高速ビデオカメラ等の実験機材使用に関してご協力いただいた株式会社ナックイメージテクノロジー様に深く感謝いたします。

文 献

- (1) J. D. Smith, V. Sick, Factors Influencing Spark Behavior in a Spray-guided Direct-Injected Engine, SAE paper, (2006) 01-3376
- (2) Y. Yan, S. Gashi, J. M. Nouri, R. D. Lockett and C Arcoumanis, Investigation of spray characteristics in a spray-guided DISI engine using PLIF and LDV, Journal of Physics: Conference Series 85 (2007) 012036
- (3) S. Pischinger, J. B. Heywood, A Model for Flame Kernel Development in a Spark-Ignition Engine, Proceedings of the Combustion Institute 23 (1990) 1033-1040
- (4) T. X. Phuoc, Laser spark ignition: experimental

- determination of laser-induced breakdown thresholds of combustion gases, Optics Communications 175 (2000) 419-423
- (5) V. Groß, R. Schiessl, H. Kubach, U. Spicher, U. Maas, Influence of Laser-induced Ignition on Spray-guided Combustion -- Experimental Results and Numerical Simulation of Ignition Processes, SAE Paper, (2009) 01-2623
- (6) N. Glumac, G. Elliott, The effect of ambient pressure on laser-induced plasmas in air, Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) 27-35
- (7) L. M. Pickett, S. Kook, H. Persson, Ö. Andersson, Diesel fuel jet lift-off stabilization in the presence of laser-induced plasma ignition, Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 2793-2800
- (8) F.Ahmed, N.Kawahara, E.Tomita, M.Sumida, Characterization of the Spray of the DISI Multi-hole Injector by Means of Phase Doppler Anemometer, Journal of Thermal Science and Technology, (2010) 36-50
- (9) 山本学, プラズマの分光計測, (1996), 学会出版センター
- (10) A. Proctor, P. M. A. Sherwood, Data Analysis Techniques in X-ray Photoelectron Spectroscopy, Anal. Chem., 54 (1), (1982), 13-19
- (11) A. M. sing, U. Riedel, J. Warnatz, W. Herden, H. Ridderbusch, Laser-induced breakdown in air and behind droplets: A detailed Monte-Carlo simulation, Proceedings of the Combustion Institute 31 (2007) 3007-3014
- (12) 池田義男, 津田紀生, 山田諄, YAGレーザーで生成した液体プラズマの成長特性, 愛知工業大学研究報告, 第 41 号 B (2006), 21-26
- (13) 河原伸幸, 富田栄二, 超音波浮揚における液滴近傍音響流の PIV 計測, 微粒化, 14-47, (2005), 39-46



河原 伸幸
 岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 准教授
 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8235
 FAX: 086-251-8266
 Mail:kawahara@mech.okayama-u.ac.jp
 略歴: 1997年 神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学), 主として熱

流体现象のレーザー計測, 熱機関, 液体燃料の微粒化に関する研究に従事.



富田 栄二
 岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 教授
 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8049
 FAX: 086-251-8266
 Mail:tomita@mech.okayama-u.ac.jp

略歴: 1981年 京都大学大学院機械工学専攻修士課程修了, 工学博士, 主として熱機関, 燃焼のレーザー計測, モデリングに関する研究に従事.



中村 紳哉
 岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻
 動力熱工学研究室
 修士1年