

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

**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
(第一報 噴霧濃度がプラズマの生成特性に与える影響)****A Study of Laser-induced Breakdown Ignition in Fuel Spray (1st Report: The Effect of Number Density of Droplet on Characteristics of Plasma Generation)**

瀬尾 健彦*・久富 康博・三上 真人

SEO, Takehiko*, HISATOMI, Yasuhiro, and MIKAMI, Masato

山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1
Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan

2012年7月9日受付; 2012年10月8日受理 / Received 9 July, 2012; Accepted 8 October, 2012

Abstract : In order to ignite fuel spray directly by a laser beam, it is necessary to investigate the characteristics of laser-induced breakdown ignition and generation of plasma as ignition sources in fuel spray. This study conducted experiments of laser-induced breakdown ignition in an ethanol spray and laser-induced breakdown in water mists by using the third harmonic of the Q-switched Nd:YAG laser. Photographs of the flame and the plasma were taken and laser beam energy for laser-induced breakdown was measured. The results of laser-induced breakdown ignition experiments show that the laser-induced breakdown ignition in a fuel spray was possible even at low incident energies that the laser-induced breakdown did not occur in air. The results of laser-induced breakdown experiments show that plasma was generated at the focal point in air, on the other hand, plasma was generated at multi-points in water mist. And the laser-induced breakdown occurred at much lower incident energy than that in air. The probability of breakdown occurrence increased with the incident energy and showed higher value at higher number density of water droplet.

Key Words : Laser-induced breakdown ignition, Plasma, Spray, Incident energy, Probability of breakdown occurrence**1. 緒言**

近年、エネルギー問題として化石燃料の枯渇が懸念されており、内燃機関の高効率化が求められている。これを実現させる方法の一つとして、燃焼室に直接燃料を噴射して着火させる筒内直噴エンジンが挙げられ、中でもスプレーガイド方式が注目されている。しかし、噴霧と点火プラグの近接による噴霧の乱れから燃焼にばらつきが生じることや、噴霧が点火プラグの電極に直接干渉するために着火の制御が困難となることが課題となっている。このことから点火プラグに替わる新たな着火方法の確立の重要性が高まっている。このような着火方法にレーザー着火が挙げられる。レーザー着火は、可燃混合気中でレーザー励起ブレイクダウン[1-4] (以下、ブレイクダウンと略す) を起こすことにより生成されるプラズマを着火源として用いた着火方法[5-9]である。レーザー着火は非接触での着火であることから、火花点火方式で用いる点火プラグの電極による熱損

失の影響がないことや着火位置の自由度が高いという特徴を有している。

燃料噴霧に直接レーザー光を照射して着火させるには、着火の契機となるプラズマの気液二相流中における生成メカニズムの解明が重要となる。レーザー着火やブレイクダウンについての研究は、主に気体もしくは固体[10]を対象として行われてきており、噴霧を対象とした研究はそれほど多くない。単一液滴を用いたプラズマの生成に関しては、Pinnik ら[11]が Nd:YAG レーザーを用いて、レーザー光の波長とレーザー励起ブレイクダウンに必要なエネルギー密度についての調査を行い、空気中よりも単一液滴の方がブレイクダウン閾値は小さくなることを示している。また、河原ら[12]は単一液滴を用いて、液滴界面に沿ったプラズマの生成や燃料液滴自身のレンズ効果により集光レンズの焦点位置よりも短縮された位置でブレイクダウンが起こる可能性を示している。噴霧中におけるプラズマの生成メカニズムについては、Musing ら[13]はモンテカルロ法を用いたシミュレーションをもとに検討を行っているが、未だ十分な解明には至っていない。

* Corresponding author. E-mail: tseo@yamaguchi-u.ac.jp

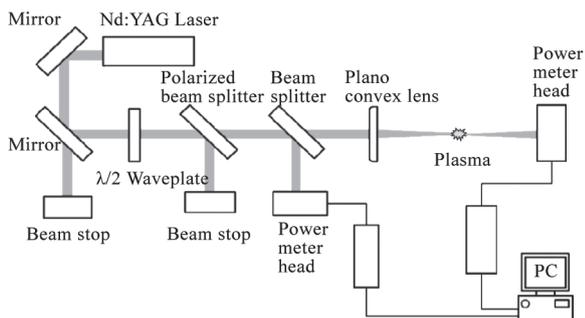


Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

実燃焼器への適用を視野に入れた場合、着火の確実性が求められることから、燃料の噴霧特性とレーザー着火特性との関係を十分に理解しておく必要がある。そこで本研究では、Nd:YAG レーザーによるエタノールを用いた燃料噴霧の着火実験および燃料の代わりに水を用いた噴霧においてレーザー励起ブレイクダウン実験を行い、噴霧濃度がプラズマの生成に及ぼす影響についての調査を行った。

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の概略図を図1に示す。レーザー光源としてNd:YAGレーザー(Spectra Physics製, PRO-230-10SE)の第3高調波(波長 $\lambda = 355$ nm, パルス幅約6 ns, 最大出力約375 mJ/pulse ビーム径 $d = 8$ mm)を、焦点距離 $f = 100$ mm, レンズ径40 mmの平凸レンズを用いて集光した。レーザーを可視光としないことにより、紫外域での感度を持たない撮影装置を用いた計測では噴霧からのMie散乱の影響を受けないという利点がある。ブレイクダウン特性にレーザー光の時間および空間プロファイルが影響を及ぼすことが堀らにより報告されている[14]。本研究では、それらの影響を避けるために、1/2波長板、偏光ビームスプリッターを用いて、時間および空間プロファイルを変化させることなくレーザー光エネルギーの調節を行った[15]。また、パワーメータ(OPHIR, PE50BF)2台を使用し、集光レンズへの入射エネルギーと集光後の透過エネルギーの同時計測を行った。入射エネルギーから透過エネルギーを減ずることにより、プラズマの生成に消費されるエネルギーをパルスごとに求めることができる。

燃料噴霧着火実験に用いた装置概略図を図2に示す。燃料にはエタノールを用い、手押しポンプにより手動で微粒化し、焦点近傍にレーザーの光軸に対して垂直な方向に供給することにより着火実験を行った。微粒化された燃料は半導体励起固体レーザー(Shanghai Dream Lasers Technology Co., Ltd製, SDL-532-050F)を用いて可視化された。燃料噴霧、プラズマおよび火炎をCMOSカメラ(CASIO, EX-F1)を用いて300 fpsで撮影した。

空気中におけるブレイクダウン実験は、ブレイクダウン特性が雰囲気中のちりに影響を受けないよう、乾

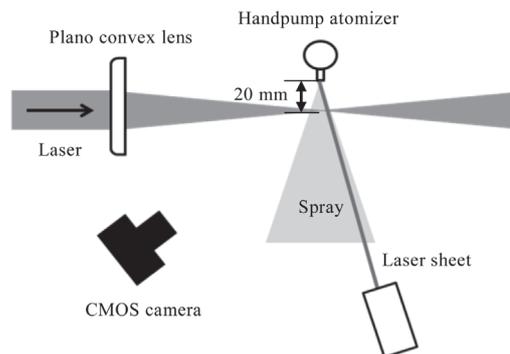


Fig.2 Schematic of experimental apparatus for laser-induced breakdown ignition in ethanol spray.

燥空気を5 L/minで焦点近傍に供給して行った。噴霧中におけるブレイクダウン実験は、燃料噴霧の代わりに水噴霧を用いて行った。噴霧供給量が調整可能な超音波噴霧器(株式会社アピックスインターナショナル, AHD-010)を用いて異なる噴霧液滴数密度の水噴霧を生成し、内径16 mmの円管を通して焦点が円管出口より下流側20 mmおよび噴霧の中央となるよう鉛直上向きに供給した。なお、噴霧の断面直径は16 mmであった。供給する水噴霧の液滴径および液滴数密度は、位相ドップラー粒子分析計(PDPA: Phase Doppler Particle Analyzer, TSI, 2D-PDPA)を用いて計測した。なお、円管から供給される水噴霧において、液滴は断面内にほぼ均一に分布していることがPDPA計測により確認されている。空気中および噴霧中におけるブレイクダウンにより生成されたプラズマは、ハイスピードカメラ(Phantom Vt.9.0, Vision Research Inc.)を用いて10 fpsで撮影した。なお、撮影画像が噴霧のMie散乱の影響を受けないように、カメラには紫外光カットフィルター(Kenko, L41 Super Pro Wide)を設置した。

3. 実験結果および考察

3.1. 燃料噴霧着火実験

図3に燃料噴霧中におけるレーザー励起ブレイクダウン着火時の噴霧、プラズマおよび火炎の時系列画像を示す。着火のためのレーザーは画像左側から入射されており、その入射エネルギーは5 mJとした。(a) $t = 0$ msにおいて、噴霧中に複数のプラズマが生成されており、光軸方向の広い範囲に分布している様子が見て取れる。3.2節において後述するが、気体中でのプラズマ生成には18 mJ程度の入射エネルギーが必要であることから、噴霧中においては空気中よりも格段に低い入射エネルギーでのプラズマ生成が可能であることが分かる。(c) $t = 13$ msでは、青炎および輝炎が確認でき、着火が成功し燃料噴霧に燃え広がったことが分かる。(b) $t = 6.7$ msでは、破線白円内に輪郭は明瞭ではないが明るい領域が存在していることが確認できる。この領域は、着火が失敗した場合には見られなかったことか

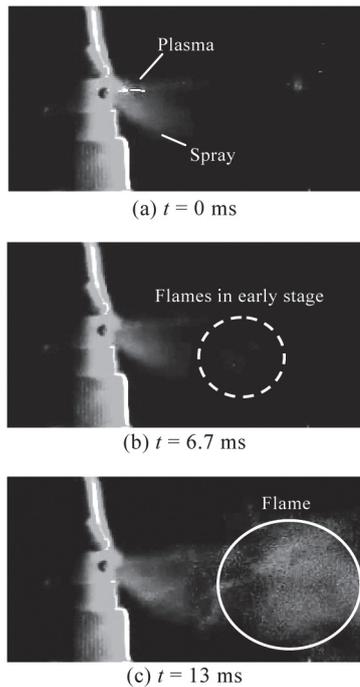


Fig.3 Laser-induced breakdown ignition in ethanol spray (Incident energy: 5 mJ).

ら, 初期の火炎であると考えられる. 以上のことから, 燃料噴霧において, 気体の着火に比べて格段に小さな入射エネルギーでも着火が可能であることが分かった. しかしながら着火が失敗する場合もあり, これは手動での微粒化によるレーザー入射時における噴霧特性の違いが原因であると考えられる. そこで, 3.2 節では噴霧濃度が着火源となるプラズマの生成特性に与える影響について燃料の代わりに水噴霧を用いて詳細に調べる.

3.2. 噴霧中におけるプラズマの生成特性

3.2.1. 噴霧中におけるプラズマの生成特性

図 4 に (a) 空気中および (b) 水噴霧中におけるブレイクダウンにより生成したプラズマの直接画像を示す. 図中の破線は焦点の軸方向位置を表している. 図の左側からレーザー光を照射し, その入射エネルギーは約 19 mJ である. また噴霧中におけるプラズマの画像は噴霧の液滴数密度が 68.7 mm^{-3} の場合のものであり, 5 パルス分を示している. 空気中では, レンズの焦点位置でプラズマが一つだけ生成されていることがわかる. 一方, 噴霧中では多点でプラズマが生成されており, その大きさはパルス毎, プラズマ毎に異なっていることがわかる. さらに, プラズマが生成される位置も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る.

図 5 に空気中および水噴霧中における入射エネルギーとその減衰率の関係を示す. エネルギーの減衰率は, 入射エネルギーから透過エネルギーを減じたものを入射エネルギーで除することで求めた. 空気中において, 入射エネルギー

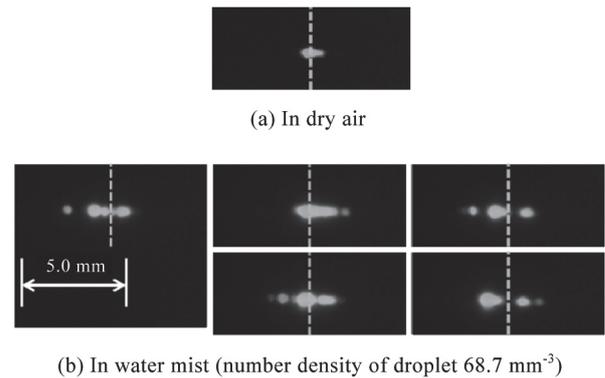


Fig.4 Typical photographs of laser-induced plasma in dry air and water mist for incident energy of 19 mJ. The white broken line shows the axial position of laser focal point.

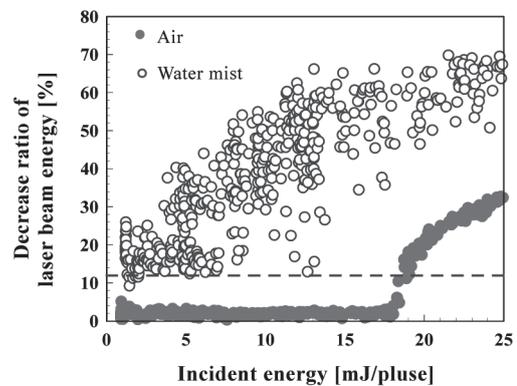


Fig.5 Decrease ratio of laser beam energy in dry air and water mist with number density of droplet of 68.7 mm^{-3} .

ギーが 18 mJ まではエネルギーの減衰率はほぼ 0% でありエネルギーの消費がないことからプラズマが生成されず, 18 mJ 以上の入射エネルギーでブレイクダウンが起こり始めることが分かる. 一方, 噴霧中においては, 入射エネルギーが 1 mJ 程度であっても減衰率は 10% を下回ることがないことが分かる. しかしながら, この入射光エネルギーにおけるプラズマの生成確率は非常に低いことから, この減衰率は液滴の Mie 散乱によるものであると考えられる. 図 5 中に破線で減衰率 12% を示しているが, 実験を行った噴霧での Mie 散乱の影響は概ね 12% 程度であることが分かる. 噴霧中では 1 mJ 程度の入射エネルギーでプラズマの生成が確認でき, この値は空気中におけるブレイクダウンに比べ格段に低い値であり, Pinnik ら[12]の単一液滴を用いた実験の報告と傾向が一致する. これは, 液滴のレンズ効果[13]や分子数密度の高い液滴表面で励起されたために, ブレイクダウンに必要な入射エネルギーが減少したのではないかと考えられる. また, 噴霧中でのブレイクダウンでは, 入射エネルギーを一定としても透過エネルギーは一定とならないことが分かった. これは, プラズマの生成によって消費されたエネルギーや生成されたプラズマによって吸収されるエネルギーがパルス毎に異なること

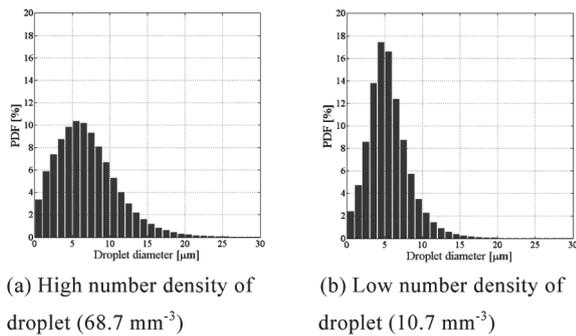


Fig.6 Droplet size distributions of water mists with two different number densities of droplet.

を意味している。その要因として、噴霧中ではプラズマの数や大きさがパルス毎に異なっているためであると考えられる。

3.2.2. 噴霧濃度がブレイクダウンエネルギーに与える影響

噴霧濃度がブレイクダウンで消費されるエネルギーに与える影響について考えるために、異なる液滴数密度における入射エネルギーとその減衰率の関係について考察を行う。対象とした噴霧の液滴数密度は 68.7 mm^{-3} と 10.7 mm^{-3} であり、それぞれの場合の粒径分布を図6に示す。液滴数密度が 10.7 mm^{-3} では 68.7 mm^{-3} の場合と比べ、 $5 \mu\text{m}$ 前後の直径を持つ液滴の存在確率が大きくなっていった。なお、ザウタ平均液滴径 (SMD) はそれぞれ $11.6 \mu\text{m}$ と $8.26 \mu\text{m}$ であった。図7(a)に液滴数密度が 68.7 mm^{-3} の場合、(b)に 10.7 mm^{-3} の場合の入射エネルギーとその減衰率の関係を示す。液滴数密度が 68.7 mm^{-3} の場合では 6 mJ 程度入射するとほぼプラズマが生成されているのに対し、 10.7 mm^{-3} の液滴数密度では、さらに高いエネルギーのレーザー光を入射したとしてもプラズマの生成が確認されない場合も見受けられる。これは、液滴数密度の高い場合では、ブレイクダウンに必要なエネルギー密度の高い領域に液滴の存在する確率が高くなるためであると考えられる。また、どちらの場合においてもブレイクダウンが起こった際には、同じ入射エネルギーに対しエネルギーの減衰率は一定となることが分かった。しかしその変動幅は、液滴数密度が低い場合の方が高い場合に比べて広がる傾向があることが分かった。この違いに関しては、生成されるプラズマの大きさや個数などが関係していると考えられる。

3.2.3. 異なる噴霧濃度の噴霧中におけるプラズマの生成確率

図8に実験的に求めた異なる噴霧濃度の水噴霧中におけるプラズマの生成確率を示す。示した結果は、液滴数密度が、 57.9 mm^{-3} 、 29.8 mm^{-3} 、 12.3 mm^{-3} の条件のものであり、SMDはそれぞれ $15.8 \mu\text{m}$ 、 $16.9 \mu\text{m}$ 、 $6.6 \mu\text{m}$ である。また、代表的な入射エネルギーで生成されたプラズマの直接画像の一例を示す。本研究における生成確率とは、連続する500パルス分の焦点位置近傍の直接撮影によって得られた

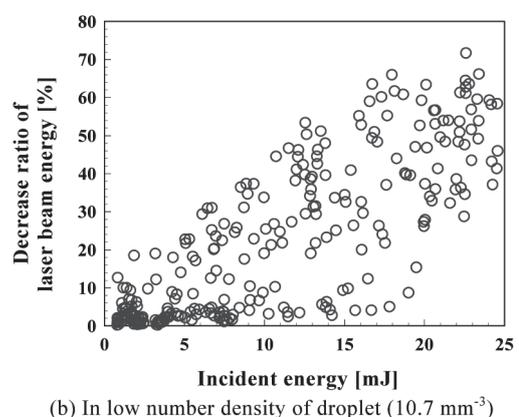
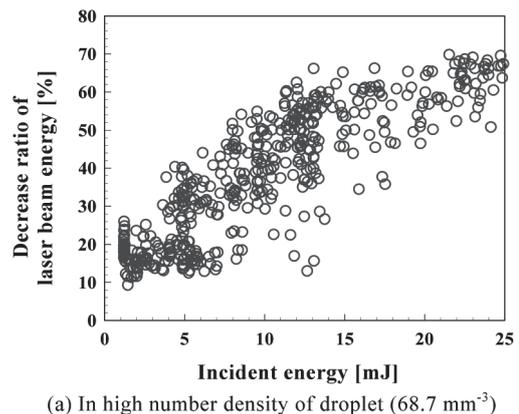


Fig.7 Decrease ratio of laser beam energy in water mists with two different number densities of droplet.

画像の中で、プラズマの生成が確認できる画像の割合として表わしている。入射エネルギーの増加に伴い、どの液滴数密度の場合でもプラズマの生成確率は上昇しており、また液滴数密度が 57.9 mm^{-3} の場合のプラズマの直接画像から、生成されるプラズマの個数が増加し生成領域も広がる傾向が見取れる。このことからプラズマの生成確率には、高いエネルギー密度の領域に液滴が存在する確率が大きな影響を及ぼしていると考えられる。液滴数密度がプラズマの生成確率に与える影響については、 6 mJ 程度の入射エネルギーで 57.9 mm^{-3} の場合ではほぼ97%のプラズマ生成確率であり、液滴数密度が 29.8 mm^{-3} 、 12.3 mm^{-3} と減少するにつれて、それぞれ90%、60%程度と生成確率が下がることが見て取れる。しかしながら、入射エネルギーが 6 mJ の場合のプラズマの直接画像に示したように、液滴数密度が減少するにつれてプラズマの生成個数は減少するが、個々のプラズマの大きさは大きくなる傾向があることが見て取れる。このことは、液滴の粒径や分布のみならず、液滴数密度の高い場合には Mie 散乱による入射エネルギーの減衰の影響を大きく受けることが原因とも考えられる。生成されたプラズマの特性については、着火確率に直結するものであると考えられるため、噴霧特性とともに今後統計的に検討していく必要があると考える。

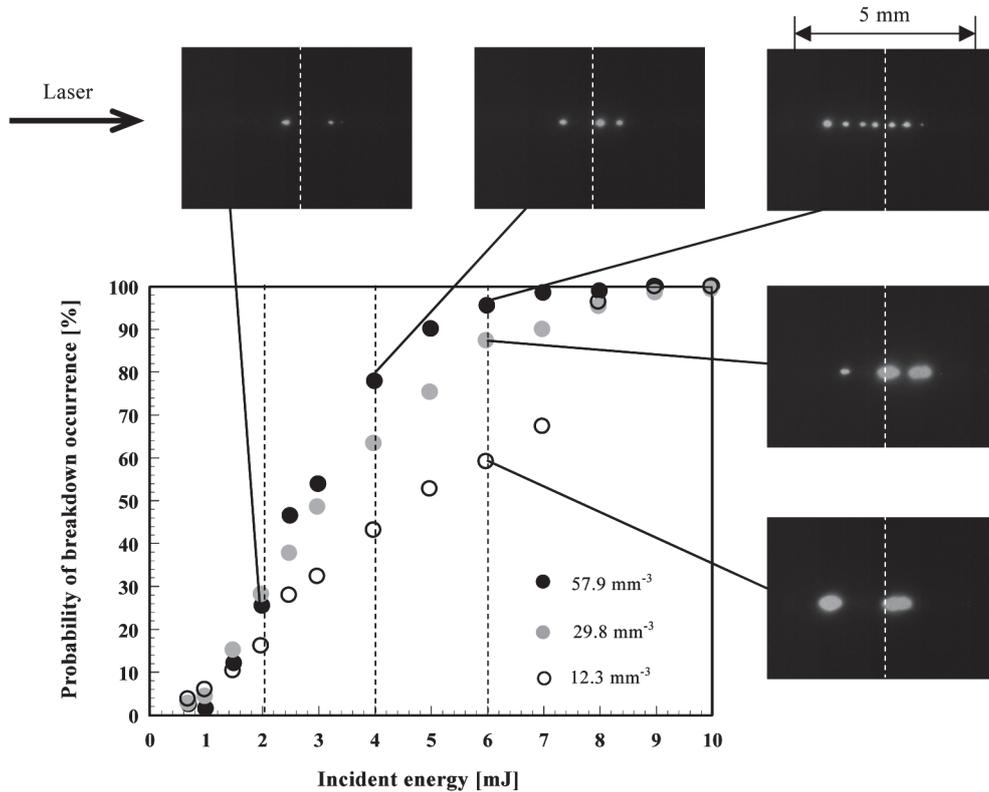


Fig.8 Probability of breakdown occurrence for different incident energies and number densities of droplet. (Typical photographs of laser-induced plasma in water mists are also shown for different incident energies and number densities of droplet. The white broken line shows the axial position of laser focal point.)

4. 結言

Nd:YAG レーザーによる燃料噴霧の着火実験および燃料の代わりに水を用いた噴霧中におけるレーザー励起ブレイクダウン実験を行い、噴霧濃度がプラズマの生成に及ぼす影響についての調査を行った。以下に得られた主な知見を示す。

1. 噴霧中においては空気中よりも格段に低い入射エネルギーでブレイクダウンが起こることが分かった。さらに、燃料噴霧を用いた着火実験から、気体中におけるブレイクダウンに必要なレーザーの入射エネルギーの 1/4 程度の格段に小さなエネルギーでも着火が可能であることが分かった。
2. 噴霧中においては、多点でプラズマが生成され、その数、大きさ、位置はパルス毎に異なることが分かった。
3. プラズマの生成確率には、ブレイクダウンに必要なエネルギー密度の高い領域に液滴が存在する確率が大きく影響を及ぼしている。
4. 液滴数密度が減少するにつれてプラズマの生成個数は減少するが、個々のプラズマの大きさは大きくなる傾向がみられた。

References

1. Morgan, C. G., *Rep. Prog. Phys.* 38: 621-665 (1975).
2. Ronney, P. D., *Opt. Eng.* 33: 510-521 (1994).
3. Lim, E. H., McIlroy, A., Ronney, P. D., and Syage, J. A., *Transport Phenomena in Combustion*: 176-184 (1996).
4. Chen, Y. L., and Lewis, J. W. L., *Opt. Exp.* 9: 360-372 (2001).
5. Morsy, M. H., Ko, Y. S., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 119: 473-482 (1995).
6. Jian X. Ma, Dennis R. Alexander, Dana E. Poulain., *Combust. Flame* 112: 492-506 (1998).
7. Beduneau, J. L., Ikeda, Y., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 84: 123-139(2004).
8. Saito, T., Furutani, H., Takahashi, S., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 73-727: 887-893(2007).
9. Hayashi, J., Sawanaka, Y., Nakatsuka, N, Okada, T., Akamatsu, F., Seo, T., Hori, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 76-772: 2242-2248 (2010).
10. Taniguchi, M., Kobayashi, H., Azuhata, S., *Proc. Combust. Inst.* 26: 3189-3195 (1996).
11. Pinnick, R. G., Chylek, P., Jarzembski, M., Creegan, E., Srivastava, V., Fernandez, G., Pendleton, J. D., Biswas, A., *Appl. Opt.* 27-5: 987-996 (1988).

12. Kawahara, N., Tomita, E., Nakamura, S., *Atomization* (in Japanese) 20-70: 61-67 (2011).
13. Musing, A., Riedel, U., Warnatz, J., Herden, W., Ridderbusch, H., *Proc. Combust. Inst.* 31: 3007-3014 (2007).
14. Hori, T., Akamatsu, F., Shibahara, M., Miyata, D., Katsuki, M., *Journal of High Temperature Society* (in Japanese) 31-2: 122-128 (2005).
15. Phuoc, T. X., *Optics and Letters in Engineering* 44-5: 351-397 (2006).