

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420138

研究課題名(和文) レーザー誘起ブレイクダウンを用いた密度分布測定

研究課題名(英文) Measurement of density distribution of droplets by laser-induced breakdown

研究代表者

屋代 英彦 (Yashiro, Hidehiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：30358197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー誘起ブレイクダウン法はエアロゾル中の液滴数密度を絶対測定できる唯一の方法である。ブレイクダウン発生確率を測定するためには多数のレーザー照射回数が必要なこと、密度分布測定には多数の測定点が必要で測定時間は飛躍的に増大する。測定の短時間化には多点同時照射及び計測技術が必須となる。DOE (Diffractive Optical Elements) と平凸レンズで6x6の36点に格子状に集光し画像処理から複数点の同時測定を行った。実験結果として得られた密度分布は尤もらしい値で評価された。このように同時多点密度計測の手法を確立し分布測定時間の大幅な短縮が可能となった。

研究成果の概要(英文)：Laser-induced breakdown method is the only way that can measure the absolute number density of droplets in aerosol. However, this measurement method requires a large number of laser shots. Moreover, enormous measurement points are required for a spatial density distribution of aerosol. A technique of the density measurements at multiple points simultaneously is essential way to be shortened the measurement time for density distribution. A laser beam is divided into 6x6 beams by a DOE (Diffractive Optical Elements) and focused by a plano-convex lens on lattice-shape. Each breakdown at the multiple measurement points is observed by a camera system. Actual density distribution of aerosol ejected from a spray nozzle is observed plausibly by this system. This measurement system reduces the measurement time for the density distribution of droplets in an aerosol effectively.

研究分野：物理学

キーワード：レーザー生成プラズマ レーザー エアロゾル 液滴 ブレイクダウン

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルは多様な産業で様々な目的で使われている。この放出されたエアロゾルの特徴を把握するために粒度分布、粒子速度などの計測装置は開発され現在市販されている。一方、密度分布を測定する方法はほとんどなくシュリーレン法、LIF (Laser-Induced Fluorescence) 法に代表される像の形状を把握する測定方法が主流であり、密度分布は画像のイメージでしかなく相対値でしかない。可視レーザー光の透過強度からトモグラフィを利用した方法[1]があるが、相対値でしかない。絶対値で液滴密度を測定する方法として、放射光からの X 線を利用した透過像から密度分布を計測する手法[2]があるが、光源の制限などから市販の計測装置とは成り得ていない。産総研ではレーザー誘起ブレイクダウンの発生閾値の違いを利用してエアロゾル中の液滴数密度を測定する方法を考案し実証した。[3]この測定方法はレーザーパルス幅に匹敵する時間分解能を持つため、高速に噴霧されたディーゼルエンジン内の燃料液滴の空間分布測定、時間変化などが測定可能であり、エンジン性能の向上に繋がる測定手法であると考えている。[4]同時に小型の光源で可能であるため計測の市販品に成り得ると考えている。

2. 研究の目的

レーザー誘起ブレイクダウン法はエアロゾル中の液滴数密度が測定できる優れた方法であるが、ブレイクダウンの発生確率を統計的に求めるため可能な限り多いサンプル数が望ましい。一測定点に対して 100 回以上のレーザー照射が必要であり、照射強度を変えてエネルギー依存性を測定するため測定には長時間を有する。空間分布計測、時間変化計測では飛躍的に測定点が増加し測定時間も比例して増加する。この測定時間を短縮するためには高繰り返しレーザーを照射用レーザーに用いるか、多点での同時照射を行い同時に計測を行う方法が望ましい。一方、レーザー誘起ブレイクダウン発生に伴いアブレーションルームが液滴から高速で放出され測定点並びに周辺の測定点の密度を過渡的に変化する。このため、レーザーの繰り返し周波数の上限もあり、隣接する測定点の最小距離も決定される。ブレイクダウンを必ず発生させるプローブレーザーと遅延させてブレイクダウンの発生確率を評価するプローブレーザーによるポンププローブ法の実験結果では同時集光した場合、4mm 以上の間隔を開けることでアブレーションルームの影響を受けないことが分かっている。[5]また、一測定点辺りの照射エネルギーは 10mJ 程度と低いことから、100 点近くの同時照射が理論上は可能で飛躍的に測定時間の短縮が見込まれる。

3. 研究の方法

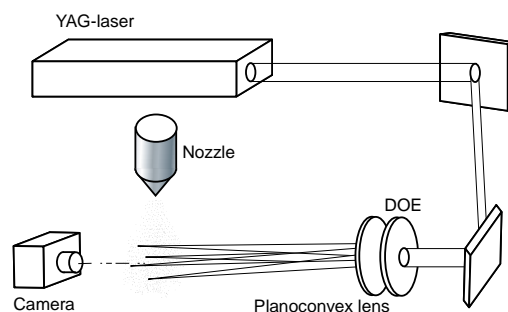


図1 実験装置図

図1に実験装置図を示す。照射用レーザーにはNd:YAGレーザー(Spectra Physics社製、Pro350、波長1064nm、パルス幅10ns、出力2.6J)を用いた。偏光子を用いて直線偏光の偏光方向を回転させることで集光プロファイルに関係なく照射強度を調整できる構造としている。レーザー光の分岐には6列6行の36点に分岐できるDOE(Diffractive Optical Elements)(住友電工社製)を用いた。この発散角は約10mradであり、レーザーは偏光子によりf250mmの平凸レンズで集光した場合、各測定点は6x6の格子状に集光され、各測定点の間隔は約2.5mmとなる。DOEの回折効率設計上76%であり、レーザーの最大出力を用いた場合、各ビームのエネルギーは50mJとなり測定に対して問題はない。DOEの下流の直後にf250mmの平凸レンズで集光した場合、集光径は66μm、レイリー長は3.90mmであった。36各集光点の強度の誤差は±1.6%以下で測定に対して問題はない。エアロゾル供給のスプレーノズルには空気圧0.5MPa、水流量10ml/minを供給しエアロゾルを図のように鉛直下方に放出した。各測定位置のブレイクダウンの発光は下流に設置したビデオカメラにより検出された。ビデオカメラは照射用レーザーと遅延パルス器を介して同期しブレイクダウン発生には必ず画像に映るように調整した。ビデオカメラの前にはレーザー光を除去するためのYAGレーザー基本波用ミラー、可視光の透過率が高く赤外域での吸収の強いハイパスフィルターを用いてレーザー光が映りこまない様に設定した。ブレイクダウン発光の一部が光学部品の端面反射から画像にゴーストとして映り込むがビデオカメラの露出、フィルターを調整することで真のブレイクダウン発光に比べてコントラストが大きく出るように調整した。同時にゴーストの発光より十分に強い強度に検出の閾値を設定して検出を行った。ブレイクダウン発生の確率評価に対しては撮影された画像において36点の発光の位置での光が検出されたか否かを判断し二値化をおこなう。撮影画像を1000枚読み込み、二値化の結果を重ね合わせ各測定点におけるブレイクダウン発生確率を評価した。

4. 研究成果

図 2 に典型的なブレイクダウン発光の画像を示す。各測定点で $1.48 \times 10^{10} [\text{W}/\text{cm}^2]$ の照射

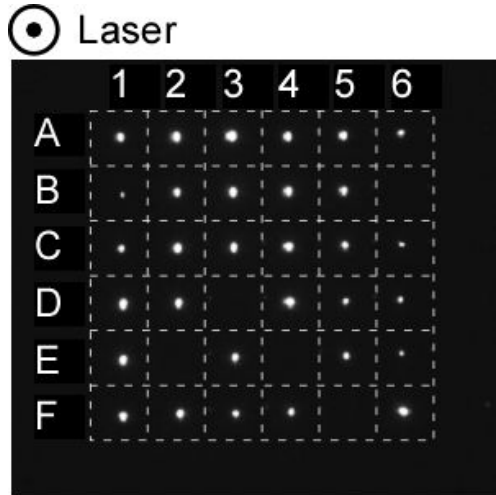


図 2 各測定点におけるブレイクダウン発光の典型的な画像

強度の場合の 1 枚の観測結果である。A の位置はノズル鉛直下 66.5 mm の位置に相当し、各点の間隔は 2.6 mm である。ノズルは 3, 4 の中間位置の上方に設定されている。レーザーは写真において裏から垂直に照射されている。図のように各測定点の間隔をピクセル数で求め x 、 y とする。各測定点の発光が中心になるように範囲を設定する。破線で示す x 、 y 間隔の仮定の測定範囲で分離する。その四角の観測範囲内で発光の有無で二値化を行い、各点での発光回数の合計を照射回数で割ることで比率を算出する。図の場合、B6、D3、E2、E4、F5 でブレイクダウンが生じていないことが分かる。このようにして各照射強度で 1000 回照射し 36 点で同時にブレイ

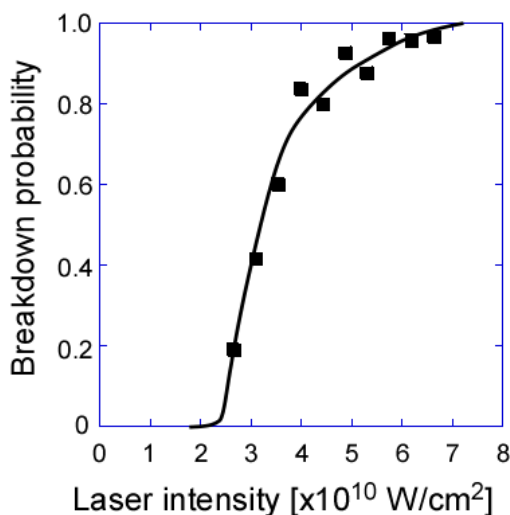


図 3 レーザー照射強度に対するブレイクダウン発生確率の依存性

クダウン発生確率を求めた。図 3 に典型的例として A3 の位置での各照射強度に対するブレイクダウン発生確率を示す。ブレイクダウン発生閾値は目視で確認した照射強度の最小値として示してある。このブレイクダウン発生閾値、実際の照射強度の比率並びに集光プロフィールからブレイクダウン発生閾値以上の体積を実際に測定されたブレイクダウン発生確率をポアソン分布を仮定して観測範囲内に存在する平均液滴数密度を求めた。その結果を図 4 に示す。この傾きから $1.06 \times 10^5 [\text{cm}^{-3}]$ と評価できる。このようにして

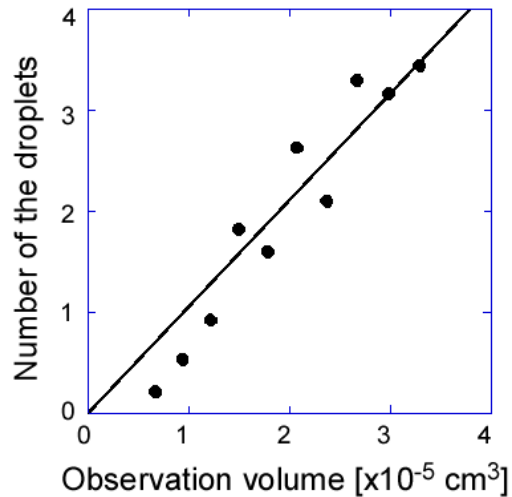


図 4 ブレイクダウン発生閾値の体積と測定範囲内の液滴数の依存性

ブレイクダウン発光の画像を評価した結果を図 5 に示す。A はノズルからの鉛直方向距離 66.5 mm の下方で、B、C、D、E、F と 69.1、71.7、74.3、76.9、79.5 mm の位置に各々相当する。図で分かるようにノズルの中心から外れると密度が下がることが分かる。同時に鉛直方向下方に行くとも全体の密度が下がっていることが分かる。このように同時に計測

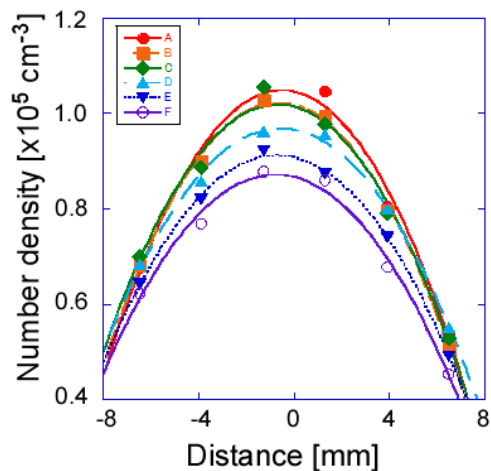


図 5 液滴数密度分布図

を行うことで測定時間が大幅に短縮できることが確かめられた。測定点間隔が2.6 mmとアブレーションルームの影響が過去の実験ではわずかに鉛直方向で残る距離であった。精密な測定のためには測定間の距離を十分にとる必要がある。同一のDOEを用いて長焦点の集光光学系を用いることで測定点間の距離を広げることが可能である。一方、測定対象密度に対して適切に集光径を選択する必要がある。[6]このため、ビーム径を所定の倍率までビームエキスパンダーで広げ、同じ倍率の長焦点レンズを用いることで測定点の間隔を広げつつ同一の集光プロファイルを維持することが可能であり、より正確な測定が可能であると考えらる。

<引用文献>

1. K.Kawamura, A.Saitoh, and Y.Tanasawa, Proceedings of ICLASS-88, (1988) 311.
2. A.G.MacPhee, M.W.Tate, C.F.Powell, Y.Y.Mattew, J.Remzo. A.Ercann, S.Narayanan, E.Fontes, J.Walther, J.Schaller, S.M.Gruner, and J.Wang, Science **295** (202) 126.
3. H. Yashiro, F. Sasaki, and M. Kakehata, Appl. Phys. Express **3** (2010) 036601.
4. H.Yashiro, M.Kakehata, and F.Sasaki, Appl. Opt. **49**, (2010) 3305.
5. H.Yashiro, and M.Kakehata, J. Appl. Phys. **113**, (2013) 173301-1.
6. Jpn. J. Appl. Phys. **49**, (2010) 076602.

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 2 件)

1. H.Yashiro, and M.Kakehata, Proc. 16th Annual Conference of ILASS-Asia, <http://ltces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2012/index.asp?password=laser>
2. H.Yashiro, and M.Kakehata, Proc. 17th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, p92.

[学会発表](計 3 件)

1. H.Yashiro, and M.Kakehata, the 1st Laser Ignition Conference '13 25 April 2015, in Yokohama.
2. H.Yashiro, and M.Kakehata, 16th Annual Conference of ILASS-Asia, Dec. 18, 2013 in Nagasaki Univ.
3. H.Yashiro, and M.Kakehata, 17th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics.

6. 研究組織

(1)研究代表者

屋代 英彦 (YASHIRO, Hidehiko)

産業技術総合研究所、電子光技術研究部門、主任研究員

研究者番号 : 30358197

(2)研究分担者

欠端 雅之 (KAKEHATA, Masayuki)

産業技術総合研究所、電子光技術研究部門、主任研究員

研究者番号 : 70356757