

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420127

研究課題名(和文) マイクロレーザープローブによる遷音速噴霧の液滴分裂過程の解明

研究課題名(英文) Study of droplet breakup process in transonic spray by micro laser probe

研究代表者

植木 弘信 (UEKI, Hironobu)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：30160154

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)：噴射圧を40～135MPaに設定した遷音速噴霧において、噴孔からの距離が10 mmの分裂過程にある液滴の速度とサイズをマイクロスケールのレーザープローブを有するレーザー2焦点流速計を用いて計測した。得られた結果は以下の通りである。(1)マッハ数が高い場合の噴霧中央の液滴サイズはマッハ数が低い場合に比べて大きい。(2)マッハ数が高い場合の噴霧周辺の液滴サイズはマッハ数が低い場合に比べて小さい。(3)液滴数密度は噴霧中心と外縁の間で高く、噴霧中心および外縁で低い。(4)マッハ数が高い場合に液滴のサイズは大きく、数密度は低い。

研究成果の概要(英文)：Measurements of temporal and spatial changes in the velocity and size of droplets of transonic diesel fuel sprays were conducted near the nozzle orifice by a laser 2-focus velocimeter (L2F). The injection pressure was set at 40 and 135MPa. Measurement positions were located at 10 mm from the nozzle exit. The distance between droplets in the direction of droplets' flight was determined by multiplying the droplet velocity and the time interval between 2 droplets sequentially passing the measurement volume. The result showed that the droplet size near the spray center was larger than that at the periphery of fuel sprays. When the injection Mach number became higher, the size of droplets became larger. The number density at the center of fuel sprays was lower than that at the periphery of fuel sprays.

研究分野：熱流体工学

キーワード：液体微粒化 レーザー2焦点流速計 燃料噴霧 噴孔近傍 液滴サイズ ウエーバー数 マッハ数

1. 研究開始当初の背景

高速噴霧による液体微粒化は、ガスタービンや往復動内燃機関の燃料噴霧、噴霧による塗装・洗浄・冷却、医療用ネブライザ、薄膜生成、パウダー製造等、多くの分野で利用されている。各分野において、要求される噴霧特性の実現のために微粒化過程の把握ならびにモデリングに関する研究が国内・国外で活発である。例えば、平成 27 年 8 月に、第 13 回国際微粒化会議(ICLASS 2015: 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems)が台湾の台南市で開催され、254 件の発表がなされた。微粒化過程の把握には、支配因子である液滴速度、ならびに微粒化の結果である液滴サイズの計測が不可欠である。しかし、微粒化過程においては液滴数密度が高いため計測例はほとんどない。一方、研究代表者は、マイクロスケールの測定体積を有するレーザー2焦点流速計を用いることによって高数密度液滴の計測が可能であることを、国内・国外の会議で公表している。

国内・国外における研究成果の発表において「液膜あるいは液柱の状態から液滴へ分裂していく過程ならびに噴霧の不均一構造がきわめて重要である」とのコメントがなされたことが本研究の契機となり、分裂前から分裂後への変化を空間的に捉える研究ならびに遷音速噴霧の構造の解明が必要との着想に至った。

2. 研究の目的

研究代表者は、2 つのレーザー光焦点によって形成されるマイクロスケールの測定体積を用いて、高速噴霧内部における個々の液滴の速度・サイズならびに液滴数密度を測定できる世界で唯一のシステムを開発している。本研究においては、噴霧の一部が超音速に達する噴射条件において、液滴の速度・サイズに及ぼす噴射速度の影響を調査することによって、遷音速噴霧内部の高数密度液滴の分裂過程を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) レーザー2焦点流速計

L2F の測定体積を図 1 に示す。焦点直径 F は約 $3\mu\text{m}$ 、焦点長さ L は約 $20\mu\text{m}$ であり、焦点間距離 S は $20\mu\text{m}$ である。

図 2 は飛行時間と散乱時間の測定原理を示している。液滴が2つの焦点を通過する際の飛行時間 t_1 、上流焦点における液滴の光散乱時間 t_2 および下流焦点における液滴の光散乱時間 t_3 を周波数 480MHz のクロックで計数する。速度は従来の L2F と同様に 2 焦点間距離 S を飛行時間 t_1 で割ることにより求める。

$$u = \frac{S}{t_1} \quad (1)$$

また、液滴サイズは、2 焦点間距離 S と液

滴サイズ d_p + 焦点サイズ F の比が飛行時間 t_1 と散乱時間の比に対応することから次式より求める。その際、散乱時間は上流散乱時間 t_2 と下流散乱時間 t_3 の平均値を用いる。

$$d_p = u \cdot \frac{t_2 + t_3}{2} - F \quad (2)$$

この測定原理は、1 個の液滴が上流側および下流側の 2 つの焦点を通過する場合に有効である。飛行時間および散乱時間を測定するフローチャートを図 3 に示す。クロックの計数は上流焦点における液滴の光散乱信号の検出によって開始され下流焦点における液滴の光散乱信号の検出によって停止し、計数値とともに上流・下流フラグが保存される。また、上流焦点光散乱検出後、下流光散乱の検知前に上流光散乱が検知される場合、計数値とともに上流・上流フラグが保存される。取得データ数 N_s は上流焦点を通過した液滴の数であり、測定開始時にセットされる。有効データは取得データの内、上流・下流フラグを持つ液滴で、測定終了後に抽出される。液滴数密度が低い場合、ほとんどの液滴間距離は 2 焦点間距離より長く、1 つの液滴が 2 焦点間を通過するときの飛行時間は正しく計測される。上流焦点を通過した液滴と別の液滴が下流焦点を通過するとき、取得データは上流・下流フラグを持つが飛行時間は過大評価となり、その液滴速度は他のデータに比

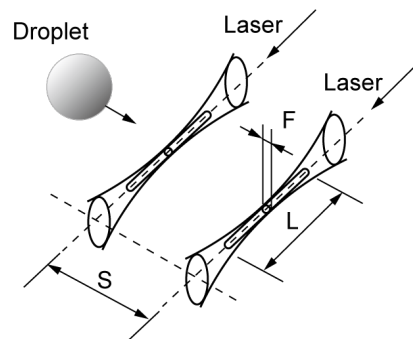


Fig.1 Light probe of L2F

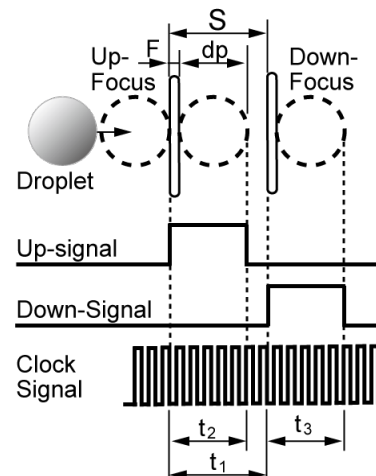


Fig.2 Time-of-flight and time-of-scattering

べてかけ離れているため容易に取り除くことができる。それに対し、液滴数密度が高い場合には局所的な液滴間距離が2焦点間距離より短くなり、上流焦点を通過した液滴が下流焦点を通過する前に、別の液滴が下流焦点を通過することが考えられる。このとき、取得データの飛行時間は過小評価となるが、液滴数密度が低い場合と同様にその液滴速度は他のデータに比べてかけ離れているため容易に取り除くことができる。

L2Fの光学系では最大出力100mW、波長830nmの半導体レーザーを光源とし、収束レンズとして焦点距離が8mm、開口数0.5の非球面レンズを採用した。全長350mmの光学系により2つの焦点における液滴からの後方散乱光を別個のAPD(Avalanche Photodiode)に導いて電気信号に変換した。FPGA(Field Programmable Gate Array)で構成したデジタルカウンタを用い、一対の電気信号パルスから計数した飛行時間および散乱時間をパソコンに保存した。信号処理系の最大データサンプリング周波数は15MHzある。

(2) 計測システム

図4はL2Fによる噴霧計測システムを示す。噴射圧を40および135MPaに設定したコモン

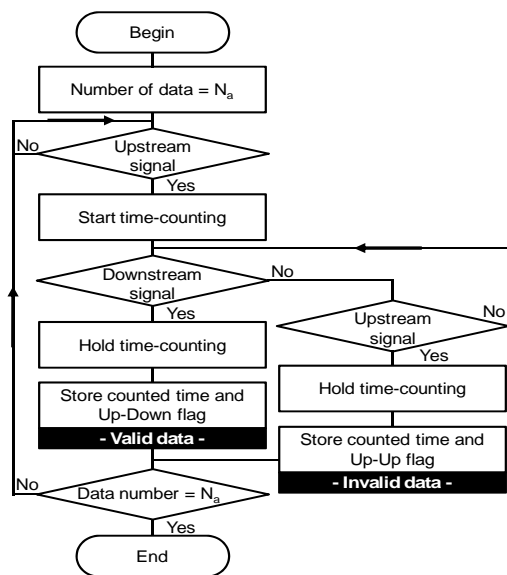


Fig.3 Fuel spray measurement system

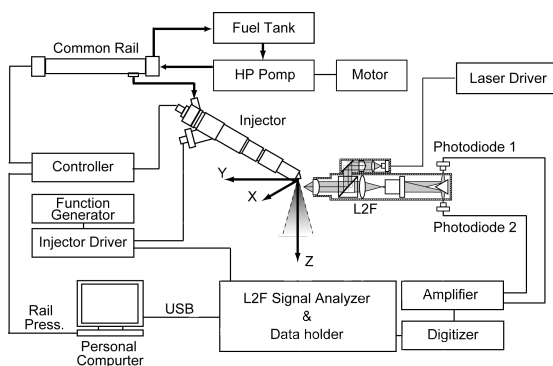


Fig.4 Fuel spray measurement system

レールにより供給される軽油を噴孔径0.112mmの8噴孔インジェクタを用いて大気中に噴射周期3Hzで間欠噴射した。L2Fのデータ取得に同期してインジェクタソレノイドに噴射開始信号を印加してからの経過時間を6MHzのクロックで計数した。測定位置を表すために噴霧軸方向をz軸、L2Fのレーザー光軸方向をy軸、yz平面に対して垂直方向をx軸とした。測定点はz=10mmにおけるx=0、±0.25、±0.5、±0.75、±1.0mmの9点である。各計測におけるデータ数は40,000点とした。

(3) 数密度の評価

噴霧内の液滴の分散は、燃料当量比の基本情報として重要であり、本研究では液滴数密度として評価した。液滴間の飛行方向の距離 L_d は、液滴が測定点を通過した後、次の液滴が通過するまでの時間 T と液滴の速度 u の積で推定できる。

$$L_d = u \cdot \Delta T \quad (3)$$

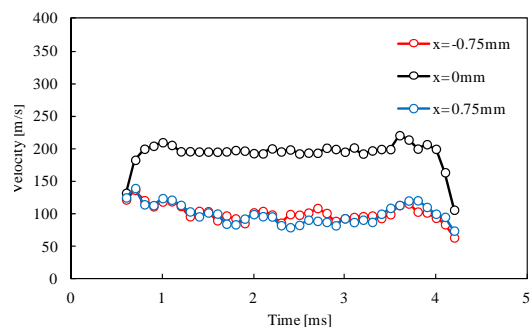
また、1つの液滴が体積 $L_d \cdot (L+d_p) \cdot (F+d_p)$ の空間に存在すると考えられることから、単位時間当たりの平均液滴数密度 N_d は次式で求められる。

$$N_d = \frac{1}{L_d \cdot (L+d_p) \cdot (F+d_p)} \quad (4)$$

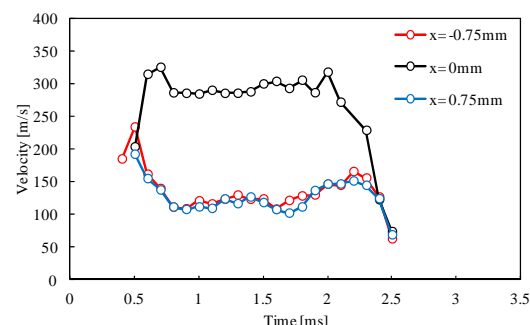
4. 研究成果

(1) 液滴の速度およびサイズの時間変化

図5(a)および(b)は噴射圧 P_{inj} がそれぞれ40MPaおよび135MPaの液滴速度の時間変化を



(a) $P_{inj}=40\text{MPa}$



(b) $P_{inj}=135\text{MPa}$

Fig.5 Time variation of velocity

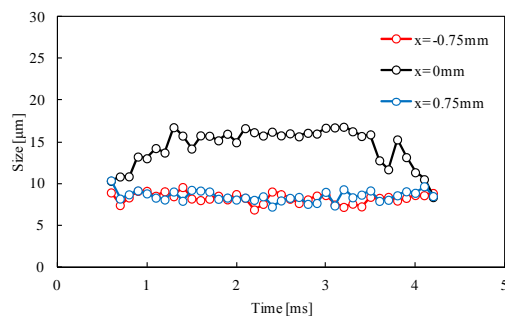
示す。噴射圧 40MPa において $x=0\text{mm}$ での液滴速度は噴射初期に増加し噴射中期に一定速度となり、その後噴射後期に液滴速度が減少した。噴射初期における速度増加は針弁リフトが立ち上がるのが原因と考えられ、また噴射終期における速度減少は針弁リフトが立ち下がるのが原因と考えられる。噴霧外縁の $x=\pm 0.75\text{mm}$ では噴射期間のほぼ全域で $x=0\text{mm}$ に比べて低い速度であった。噴射圧 $P_{inj}=135\text{MPa}$ においても同様の変化である。

図 6(a)および(b)に噴射圧 P_{inj} がそれぞれ 40MPa および 135MPa の液滴サイズの時間変化を示す。噴射圧 40MPa において $x=0\text{mm}$ での液滴サイズは噴射初期に増加し噴射中期に一定速度となり、その後噴射後期に減少した。噴射初期における液滴サイズが小さいことは噴孔内部の流れが乱れるのが原因と考えられる。また噴霧外縁の $x=\pm 0.75\text{mm}$ では噴射期間のほぼ全域で $x=0\text{mm}$ に比べて小さく、時間的変化は大きくない。噴射圧 $P_{inj}=135\text{MPa}$ においても同様の変化である。

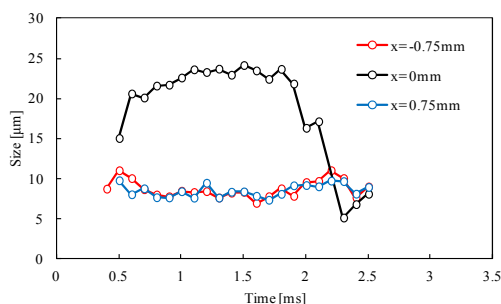
(2) 液滴の速度およびサイズの空間分布

図 7 に噴射圧 P_{inj} が 40MPa および 135MPa の液滴速度の空間分布を示す。それぞれ噴射期間の中央付近である $T=2.3\text{ms}$ および $T=1.4\text{ms}$ における空間分布である。いずれの噴射圧においても噴霧中心での液滴速度が最も速く外縁に向かうにつれて遅くなった。噴射圧が増加すると半径方向全域に渡って液滴速度は増加した。

図 8 に噴射圧 P_{inj} が 40MPa および 135MPa の液滴サイズの空間分布を示す。それぞれ噴射



(a) $P_{inj}=40\text{MPa}$



(b) $P_{inj}=135\text{MPa}$

Fig.6 Time variation of size

期間の中央付近である $T=2.3\text{ms}$ および $T=1.4\text{ms}$ における空間分布である。いずれの噴射圧においても噴霧中心で液滴サイズが大きく外縁に向かうにつれて小さくなった。噴霧中心において噴射圧が増加すると液滴サイズが増加した。すなわち、マッハ数が高い場合の噴霧中央の液滴サイズはマッハ数が低い場合に比べて大きい。また、マッハ数が高い場合の噴霧周辺の液滴サイズはマッハ数が低い場合に比べて小さい。

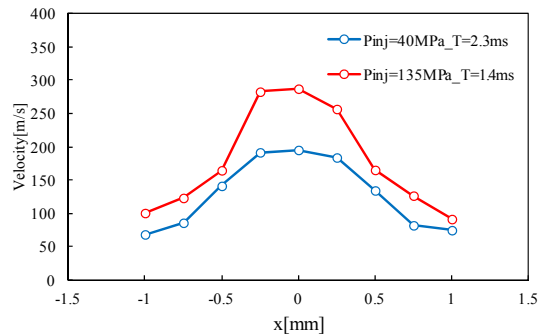


Fig.7 Radial distribution of velocity

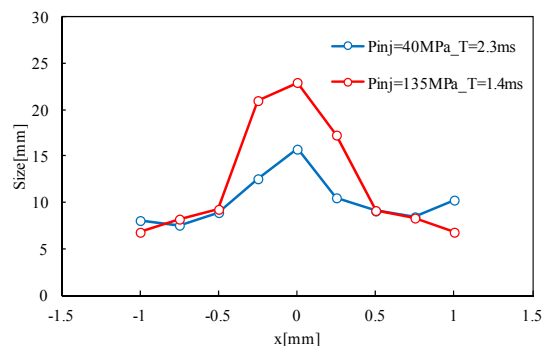


Fig.8 Radial distribution of size

(3) 液滴数密度の空間分布

図 9 に噴射圧 P_{inj} が 40MPa および 135MPa の液滴数密度の空間分布を示す。それぞれ噴射期間の中央付近である $T=2.3\text{ms}$ および $T=1.4\text{ms}$ における空間分布である。いずれの噴射圧においても噴霧中心における液滴数密度が低くなり、中心と外縁の間の $x=\pm 0.5\text{mm}$ における液滴数密度は高くなった。噴

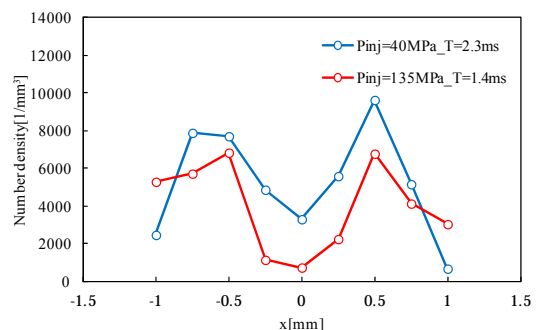


Fig.9 Radial distribution of number density

霧中心には比較的大きな液滴が存在するため液滴数密度が低くなるものと考えられる。また噴霧外縁で液滴数密度が低くなっていることは周囲空気との混合が原因と考えられる。すなわち、液滴数密度は噴霧中心と外縁の間で高く、噴霧中心および外縁で低い。また、マッハ数が高い場合に液滴のサイズは大きく、数密度は低い。

噴霧の輝度は視線方向に存在する液滴の数ならびに液滴サイズの2乗に比例すると考えられることから、L2Fから求められる $N_d \times d_p^2$ の重みで噴霧の輝度を評価した。図10に噴霧画像から算出した輝度の分布およびL2Fにより評価される輝度の確率密度を示す。噴射圧が増加するとともに噴霧画像の輝度が高くなった。これは噴射圧が増加し液滴サイズが大きくなったことが原因と考えられる。またL2Fにより評価される輝度の確率密度の分布が噴霧画像から得られた輝度の分布と近い形となった。

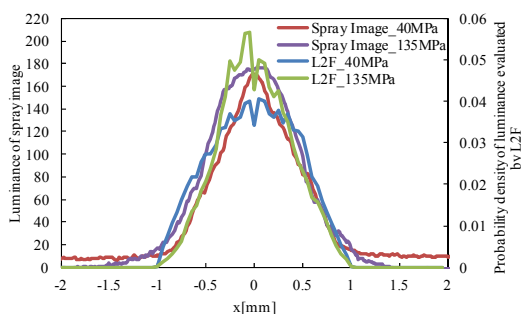


Fig.10 Radial distribution of luminance of spray image and probability density of luminance evaluated by L2F

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

1. 川原田光典, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, 小弁開度燃料噴射におけるディーゼル噴霧液滴の分裂特性, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.82, No.836, pp.1-11 (2016)
2. 川原田光典, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, Effects of Injector Valve Movement on Diesel Spray Characteristics under Short Full Valve Opening, Journal of Thermal Science and Technology, 査読有, 10-2, pp. 1-12 (2015)

〔学会発表〕(計6件)

1. 川原田光典, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, Effect of Injection Pressure on Droplet Behavior inside Diesel Fuel Sprays, JSAE/SAE International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting, (2015.9.1), 京都テルサ(京都市)
2. 鈴木啓太, 川原田光典, 坂口大作, 植木弘信, Size and Distance of Droplets in

Diesel Fuel Sprays, 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, (2015.8.24), National Cheng Kung University (台湾.台南市)

3. 駒田佳介, 田島博士, 鶴大輔, 坂口大作, 植木弘信, Effect of Needle Lift on Atomization in Diesel Fuel Spray, Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines, (2014.9.10), バレンシア工科大学(スペイン.バレンシア)
4. 駒田佳介, 坂口大作, 田島博士, 植木弘信, 石田正弘, Relation between Tip Penetration and Droplet Size of Diesel Spray, SAE World Congress, (2013.4.17), COBO Center(アメリカ.デトロイト)
5. 駒田佳介, 田島博士, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, Study on Simulation of Diesel Fuel Spray Based on L2F Measurement, ILASS-ASIA, (2013.12.18), 長崎大学(長崎市)
6. 駒田佳介, 山田孝史, 坂口大作, 田島博士, 植木弘信, 石田正弘, Study on Cyclic Variation in near-Nozzle Region of Diesel Spray by L2F, ILASS-Europe, (2013.9.4), Institute for Liquid Atomization and spray systems (ハニア.クレタ島)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植木 弘信 (UEKI, Hironobu)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30160154