

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 14 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560172

研究課題名（和文）乱れの空間相関計測による高速高数密度噴霧における渦構造の解明

研究課題名（英文）Study of vortex structure in high number density spray based on turbulence correlation

研究代表者

植木 弘信 (UEKI HIRONOBU)

長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30160154

研究成果の概要（和文）：

ディーゼル噴霧液滴を計測するために開発されたレーザー2焦点流速計(L2F; Laser 2-Focus velocimeter)を用いて、噴孔径 0.113mm の5噴孔ソレノイドインジェクタから大気中に噴射された燃料噴霧を計測した。コモンレール内圧力は 80MPa に設定され、ソレノイドに印加した噴射信号の期間は 3.0ms であった。計測は噴孔出口より 15, 20 および 25mm の断面において行った。各計測断面の測定点は3点である。相関スロット法を用いて速度、サイズおよびデータレートの乱れの相関係数を調べ、渦スケールを評価した。液滴速度の乱れのスケールは液滴サイズの乱れのスケールおよびデータレートの乱れのスケールより大きいこと、またいずれの乱れのスケールにおいても上流に比べ下流の方が大きいことが明らかになった。

2次元位相ドップラー流速計(2-D Phase Doppler Interferometer)を用いてコモンレールインジェクタにより大気中に間欠噴射されるディーゼル噴霧の計測を行った。噴霧軸近傍で液滴は噴霧軸方向の速度成分に加えて半径外向きの速度成分を有すること、および噴霧軸方向の速度成分は半径が大きくなるとともに低下することから、噴霧軸に対して斜め後方に噴霧の軌跡が観察されるものと判断された。また、噴霧の外縁から内側に向かって移動する液滴は、移動とともに半径内向きから噴霧軸下流方向へ速度ベクトルの向きを変える。これらの液滴の移動の組み合わせは渦を構成していると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

A laser 2-focus velocimeter (L2F) was used for measurements of velocity and size of droplets in diesel sprays injected intermittently into the atmosphere from an injector with an orifice of 0.113mm in diameter. The rail pressure was set at 80MPa, and the solenoid energizing time was set at 3.0ms. Three measurement positions were located on the plane 6, 9 and 12 mm from the nozzle exit. The integral scale of turbulence in velocity, the one in size and the one in data rate were evaluated by correlation based slotting technique. The integral scale of turbulence in velocity is larger than the one in size and data rate. Every scale increases with the distance of droplet flight.

Phase Doppler technique was used for the measurements of the velocity, size and flight angle of droplets in diesel sprays injected intermittently into the atmosphere from an injector. In the vicinity of the spray axis, droplets have the components of radially outward velocity in addition to that of the spray axis direction velocity. And the velocity components of spray axis direction decreased with the radius. It is understood that the trajectory of the spray observed diagonally backward come from the difference in velocities near the spray axis. Droplets which move inward from the periphery of the spray change their directions of velocity vector from the radially inward to the spray axis. A combination of the droplet movements which were mentioned above is considered to make up a vortex.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流

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 21 年に、第 11 回国際微粒化会議 (ICLASS 2009: 11th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems) がアメリカ合衆国ヴェイルで開催され、約 300 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渦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。また、飛行する液滴の速度、サイズ、2次元の飛行角度を同時に計測できる位相ドップラー流速計を所有している。本研究では以下の項目を明らかにする。

- ・噴霧内部における微粒化過程
- ・液滴分裂および渦構造の関係

3. 研究の方法

3.1. 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  $17\mu\text{m}$  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  $480\text{MHz}$  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

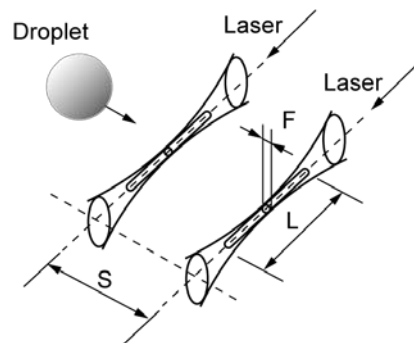


Fig.1 Light probe of L2F

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  $N_a$  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

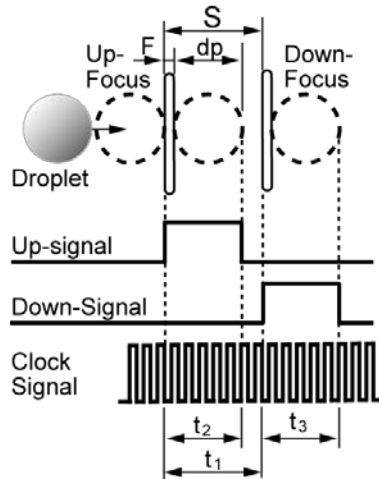


Fig.2 Time-of-flight and time-of-scattering

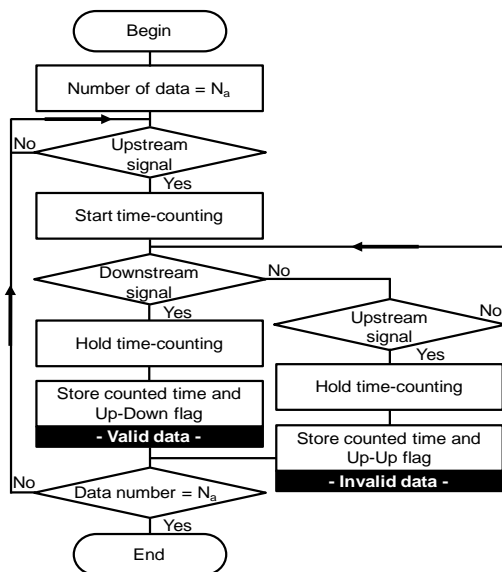


Fig.3 Fuel spray measurement system

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。

### 3.2. 計測システム

図 4(a)は L2F による噴霧計測システムを示す。コモンレールにより供給される軽油を噴孔径 0.113mm の 5 噴孔インジェクタを用いて時間間隔は 330ms で大気中に間欠噴射した。一つの噴孔から噴射される噴霧を対象に2つの焦点を噴霧軸に平行に設置し、噴霧軸方向の速度を計測した。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。座標は、噴孔出口を原点とし、噴霧軸に  $z$  軸、L2F のレーザー光軸に  $y$  軸をとり、 $yz$  軸に垂直に  $x$  軸を取った。

図 4(b)は 2 次元位相ドップラー流速計 (Artium 社製, PDI-200MD) を用いた噴霧計測システムを示す。PDI の光学系では最大出力 150mW、波長 532nm の半導体レーザー、および最大出力 50mW、波長 491nm の半導体レーザーが光源であり、トランスミッタの集束レンズとして焦点距離が 500mm のレンズが採用されている。各レーザー光の直径は 1.0mm である。また、トランスミッタとレシーバーの設定角度は 40 度である。速度およびサイズの計測可能範囲はそれぞれ 133~489m/s、および 1.0~195 $\mu$ m である。

### 3.3. 渦スケールの評価

渦構造の解析においては、不等間隔のデータから乱れの相関を求める相関スロット法を適用した。個々の速度データ  $u(t_i)$  から平均速度  $U$  は

$$U = \frac{\sum_n \sum_i u(t_i)}{\sum_n \sum_i} \quad (3)$$

より求められる。ここで、 $n$  は噴射回数、 $i$  はデータ番号、 $t_i$  はデータが得られた時刻で

ある。乱れ  $u'(t_i)$  は速度データと平均速度  $U$  の差として

$$u'(t_i) = u(t_i) - U \quad (4)$$

より求められる。

乱れの相関  $R(\tau)$  および相関係数  $C(\tau)$  は次式により求められる。

$$R(\tau) = \frac{\sum_n \sum_{i > j} u'(t_i) \cdot u'(t_j)}{\sum_n \sum_{i > j} u'(t_i) \cdot u'(t_j)} \quad (5)$$

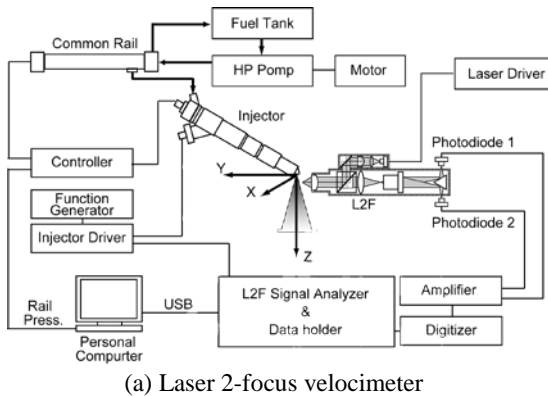
$$C(\tau) = R(\tau) / R(0) \quad (6)$$

また、遅れ時間  $\tau = (t_j - t_i)$  は整数  $k$  について、 $k \cdot \Delta\tau - \Delta\tau/2 \leq \tau < k \cdot \Delta\tau + \Delta\tau/2$  のとき、 $k \cdot \Delta\tau$  において離散化し、時間間隔  $\Delta\tau$  のスロット毎に式(5)の総和を計算する。乱れの積分スケール  $L_t$  は、

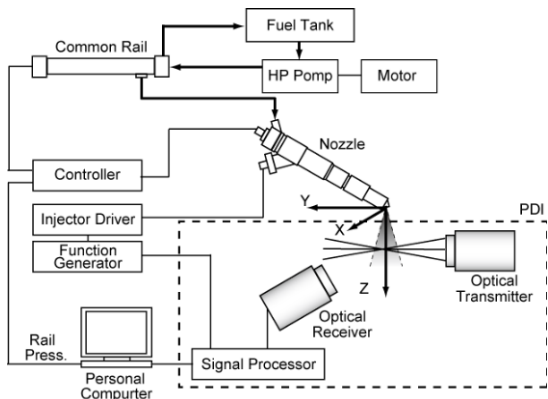
$$L_t = \sum C(\tau) \Delta\tau \quad (7)$$

より求められる。

液滴サイズの相関および乱れスケールについては、式(3)から(7)において速度データの代わりにサイズデータを用いることによって求める。



(a) Laser 2-focus velocimeter



(b) 2-D Phase Doppler Interferometer

Fig.4 Fuel spray measurement system

#### 4. 研究成果

##### 4.1. L2Fを用いた噴霧の乱れの評価

噴孔出口からの距離  $z = 15, 20$  および  $25$  mm の断面において、それぞれ半径位置  $x = 0.4, 0.6$  および  $0.8$  mm の点で計測を行った。噴射期間は  $1.0$  ms, 取得データ数  $N_a$  は  $10,000$  である。

図5は第1噴射目と第2噴射目の噴霧液滴速度の時間変化を示す。いずれの噴霧においても  $100$  個以上の液滴が測定された。

図6は噴孔から  $20$  mm の断面における噴霧中心から  $0.4, 0.6$  および  $0.8$  mm の距離での乱れの相関係数を示す。スロット幅を  $0.002, 0.003$  および  $0.005$  ms に変化させたところ、いずれのスロット幅においても相関係数は同様の傾向を示した。本研究では  $0.003$  ms のスロット幅を用いて解析を行った。  $\tau = 0.003$  ms 前後において乱れの相関係数はゼロより小さい。

図7(a)および(b)は噴孔下流  $15$  および  $25$  mm における液滴速度、サイズおよびデータレートの乱れの積分スケールを示す。データレートは単位時間当たり測定点を通る液滴の数より求めた。  $z = 15$  mm において、液滴速度の乱れの積分スケールはデータレートおよび液滴サイズの場合に比べて大きい。また  $x = 0.4$  mm に比べて  $0.8$  mm の方が大きい。

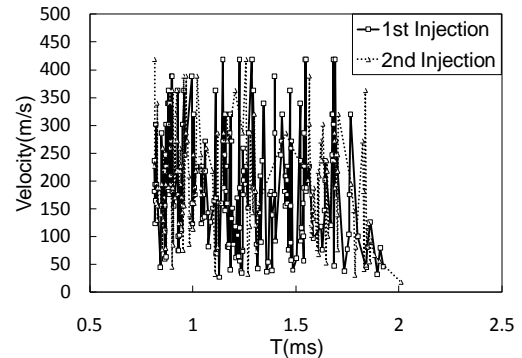


Fig.5 Time resolved velocity; first injection and second injection,  $x = 0.4$  mm,  $z = 20$  mm

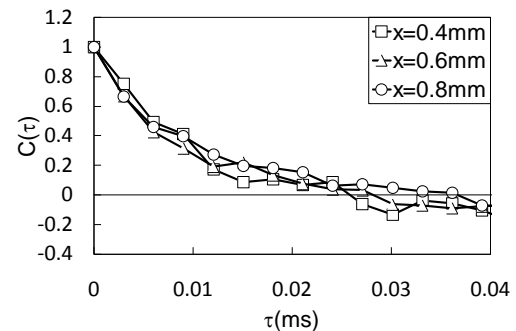


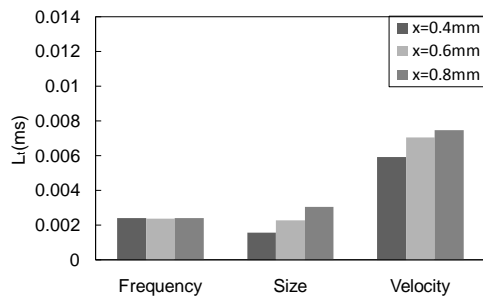
Fig.6 Correlation coefficient of turbulence in velocity;  $z = 20$  mm

$z = 15\text{mm}$  と  $20\text{mm}$  を比べると、ほとんどの半径位置において乱れの積分スケールは下流の方が大きい。

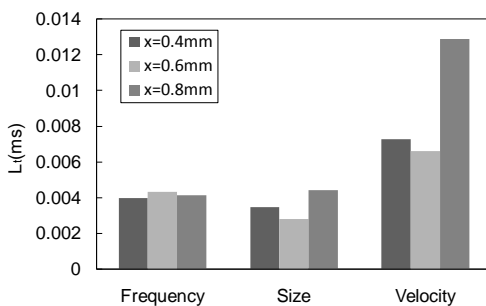
#### 4.2. 位相ドップラー流速計を用いた噴霧の不均一構造の評価

液滴の速度ベクトルを噴霧軸から $\pm 45$ 度の2つの方向の速度成分から算出し、図8に示すように、噴霧軸である $z$ 軸と速度ベクトルのなす角度を $\theta$ とした。 $y$ が正のとき、 $\theta$ が正の角度は液滴が内向きに飛行することを示し、 $\theta$ が負の角度は液滴が外向きに飛行することを示す。計測は噴孔から $40\text{mm}$ の断面において噴霧中心から $1.5$ 、 $3$ および $5\text{mm}$ の位置において行った。噴射期間は $3.0\text{ms}$ 、取得データ数 $Na$ は $10,000$ である。

図9(a)は噴霧が測定点に到達してから噴射期間、つまり $3.0\text{ms}$ の間に測定点を通じた液滴個数を確率密度で示す。横軸は飛行角度である。 $y = 1.5\text{mm}$ では、確率密度のピークは $0$ 度に存在し、液滴は主として噴霧軸方向に飛行している。 $y = 3.0\text{mm}$ の場合、 $-20$ 度にピークが存在し、このことから、 $y = 3.0\text{mm}$ においては、噴霧軸方向や外向きの速度成分を有する液滴の割合が減少し、内向きの速度成分を有する液滴の割合が増加していることがわかる。内向きの速度成分を有する液滴数は、 $y = 3.0\text{mm}$ では $40$ 度で、また $y = 5.0\text{mm}$ では $70$ 度で最多となっている。図9(b)は飛行角度ごとの平均液滴速度を示す。いずれの計測点においても $-20$ 度で平均速度が高い。



(a)  $z = 15\text{mm}$



(b)  $z = 25\text{mm}$

Fig.7 Integral scale of turbulence in velocity, size, and frequency at  $z = 15$  and  $25\text{mm}$

外向きに液滴が飛行する場合に液滴数が多いのは $y = 1.5\text{mm}$ の場合、飛行角度が $-10$ 度のときである。この角度に対応する平均速度は $52\text{m/s}$ である。 $y = 3.0\text{mm}$ において外向きに飛行する場合に液滴数が最大の角度である $-20$ 度に対応する速度は $28\text{m/s}$ である。また噴霧幅が徐々に広がっていくことから噴霧内の液滴は半径方向外側へ向かう速度ベクトルを持つことがわかる。 $y = 1.5\text{mm}$ で半径方向外向きに移動した液滴が $y = 3.0\text{mm}$ に達するとき、 $y = 3.0\text{mm}$ の空気速度が $y = 1.5\text{mm}$ のものと比較して小さいため、液滴と空気間に速度差が生じる。このことによって $y = 3.0\text{mm}$ に達した液滴は周囲空気による抵抗を受けて押し戻され、液滴は主流に対して相対的に噴霧上流の外向きに移動することになる。

内向きに飛行する液滴数の極大値は $y = 5.0\text{mm}$ の場合、 $70$ 度であり、 $y = 3.0\text{mm}$ の場合は $40$ 度である。これらより、噴霧の外

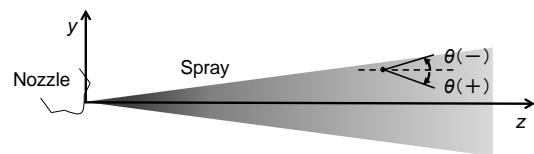
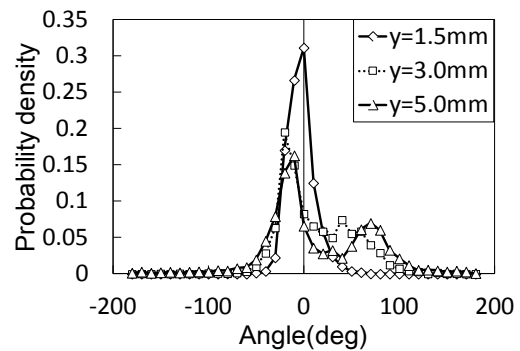
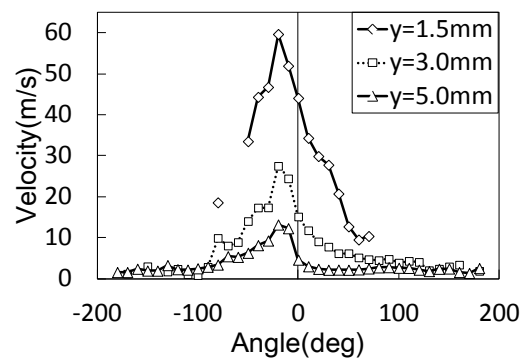


Fig.8 Angle of droplet flight



(a) Probability density



(b) Velocity

Fig.9 Probability density and velocity of droplet vs. angle

縁近傍の液滴では噴霧軸に沿う速度成分より半径内向きの速度成分が大きく、噴霧軸へ近づくと噴霧軸に沿う速度成分が増加するとともに半径内向きの速度成分は減少することがわかる。

以上のことから、外向きの液滴群と内向きの液滴群の組み合わせが渦構造に関係するものと考えられる。図 10 にその渦構造を実線で示す。半径方向外側に向かった液滴は、周囲空気の取り込みによって噴霧軸付近へ向かう。そのため  $y$  が正の値をとる範囲では図のような反時計回りの渦構造を生ずると考えられる。

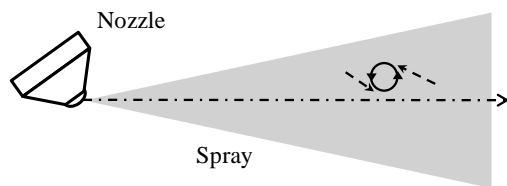


Fig.10 Vortex structure

#### 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, 駒田佳介, 植木弘信, 石田正弘, "2次元位相ドップラー法によるディーゼル噴霧の不均一構造の研究", 自動車技術会論文集, Vol43, No.1, 査読有, pp.103-108(2011)
- (2) 駒田佳介, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, "L2Fを用いたディーゼル燃料噴霧高数密度領域の液滴質量分布の評価", 日本機械学会論文集 B 編, 77 巻, 774 号, 査読有, pp.274-281(2011)

[学会発表] (計 9 件)

- (1) 坂口大作, 山本昌平, 植木弘信, 石田正弘, "Study of Breakup Process in Dense Region of Diesel Fuel Spray by Micro-Probe L2F", Proceedings of the THIESEL 2010 Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, 査読有, pp.63-74 (2010)
- (2) 山本昌平, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, "Effect of Back Pressure on Droplet Size near Diesel Injector Nozzle", Proceedings of ILASS-Asia 2010, 査読無, pp. 80-85 (2010)
- (3) 駒田佳介, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, "Measurement of Mass Distribution in Diesel Fuel Spray by Using Micro-probe L2F", Proceedings of ILASS-Asia 2010, 査読無, pp.119-124 (2010)
- (4) 駒田佳介, 川原田光典, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, "Evaluation of Mass Flow Rate Distribution in Diesel Fuel Spray by

L2F", Proceedings of the ASME2011 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, CD-ROM, 査読有, pp.1-10 (2011)

- (5) 川原田光典, 坂口大作, 駒田佳介, 植木弘信, 石田正弘, "Inhomogeneous Structure in High-Speed and High-Number-Density", Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, AJK2011-11001, 査読有, pp.1-9(2011)
- (6) 川原田光典, 坂口大作, 駒田佳介, 植木弘信, 石田正弘, "Study of heterogeneous structure in diesel fuel sprays by using 2-D phase doppler interferometer", Proceedings of the 24th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, CD-ROM, 査読有, pp.1-9(2011)
- (7) 川原田光典, 坂口大作, 駒田佳介, 植木弘信, 石田正弘, "Effect of Wall Impingement on Heterogeneous Structure in Diesel Sprays", Proceedings of 17th Small Engine Technology Conference, JSAE20119576 / SAE 2011-32-0576, 査読有, pp.1-10(2011)
- (8) 駒田佳介, 坂口大作, 田島博士, 植木弘信, 石田正弘, "Effect of Ambient Pressure on Breakup of Droplets near Diesel Injector Nozzle", Proceedings of the THIESEL 2012, 査読有, pp.1-11(2012)
- (9) 駒田佳介, 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, "Evaluation of Breakup Process of Diesel Fuel Spray by Micro Probe L2F", SAE Diesel Fuel Spray Injection and Sprays 2012, SP-2330, 査読有, pp.1-8(2012)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

植木 弘信 (UEKI HIRONOBU)  
長崎大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30160154