

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560163

研究課題名(和文)

光バンドルファイバを用いたマルチフォーカス粒子流速計の開発

研究課題名(英文)

Development of multi-focus particle analyzer with bundle fiber

研究代表者

坂口 大作 (SAKAGUCHI DAISAKU)

長崎大学・工学部・准教授

研究者番号：70244035

研究成果の概要(和文)：

ディーゼルエンジンの排気物質低減のため燃料噴霧の微粒化が求められており、高速かつ高密度の微粒子を定量的に計測できる計測装置の開発が必要とされている。本研究では、焦点構造をマイクロプローブ構造としたレーザ 2 焦点流速計を光バンドルファイバにより構成し、多点化することにより燃料噴霧の粒子速度および粒子径を空間的に計測できる多点同時計測システムを開発する。

研究成果の概要(英文)：

Atomization of fuel spray is required for reduction of emissions in a diesel engine. In order to measure high-speed and high-density particulates quantitatively, a new measurement device needs to develop. In this research, a new multi-point measurement system is developed with featuring a bundle fiber. The measurement volume has micro-probe structure with two foci, and the particle velocity and size of diesel fuel are measured simultaneously at multi-point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：流体計測

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止のため、二酸化炭素排出量の削減が求められており、熱効率の高いディーゼルエンジンの採用が増えることが予想される。特にこれからは粒子状物質 (PM) の直径がナノメートル単位であるナノパーティクルの排出が問題となる。粒子状物質の排出量を支配するものは燃料噴霧の分裂特性であるが、従来のレーザ流速計では高速かつ高密度で噴射される噴霧の分裂過程の計

測は困難であった。また、境界条件である噴孔出口での流動様相が不明なため、数値計算による噴霧分裂の予測も難しい。非定常に変化する噴霧内部の構造を定量的に計測できる新しい計測手法の開発が必要とされた。

## 2. 研究の目的

本研究者は焦点体積をマイクロスケールとし、さらに 2 焦点法の計測原理を採用することによって光学的 SN 比を飛躍的に向上

させたマイクロプローブ半導体レーザ2焦点粒子流速計を開発し、従来計測データが存在しなかった噴孔出口近傍における噴霧の流速および粒子径分布を明らかにした。マイクロプローブ半導体レーザ2焦点粒子流速計は点計測であり、非定常噴霧の構造を理解するためには、空間的に多点の計測を同時に行う必要があるという着想に至った。

そこで本研究では、マイクロプローブ半導体レーザ2焦点粒子流速計を発展させ、光学系として光ファイバを複数線束ねたバンドルファイバを採用し、多点同時計測システムを開発する。バンドルファイバのセンサプローブ先端径は小型化でき、センサプローブを空間的に複数個並べた多点計測システムが可能となる。さらに、多点の計測データを取得・処理するシステムとして、FPGA (Field Programmable Gate Array) を使って専用信号処理システムを構築する。ホストコンピュータを必要とせず、取得データを直接メモリへ書き込む回路を構成することにより、データフローのボトルネックが解消され、大量のデータを高速にサンプリングする。また、得られた粒子速度および粒子径の時間変化を統計的に解析し、燃焼に重要な質量分布を算出する解析手法を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究は (1)レーザ射出用ファイバおよび散乱光検出用ファイバ群を一本のバンドルファイバとして設計し試作すること、(2)データ処理システムとしてFPGAを用いた専用ハードウェアを構築すること、(3)多点における計測結果について噴霧の質量分布を非定常量として解析する手法を構築することの3項目について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1)バンドルファイバの試作

図1に試作したバンドルファイバおよび光学構成を示す。コア径  $200\mu\text{m}$  の石英ファイバを用い、レーザ投光用2本および受光用27本をバンドルファイバとして束ねた。レーザ光源として、FCレセプタクル型半導体レーザを用い、2本の投光用ファイバへ分光した。図2にバンドルファイバ先端部を示す。光ファイバのクラッド径は  $220\mu\text{m}$  であり、ファイバ先端における投光用ファイバ間距離は約  $450\mu\text{m}$  となる。投光用ファイバの周囲には、受光用ファイバを配置し、端面処理を施した。バンドルファイバとしてのプローブ径は約  $4\text{mm}$  であり、従来のマイクロプローブ半導体2焦点流速計の光学システムと比べ、非常に簡略化できている。また、受光用ファイバの終端はFCカプラを取り付け、光学調整が不要となるよう工夫した。図3に結像状

況を示す。試作したバンドルファイバの先端に非球面レンズを取り付け、倍率20倍の対物レンズにより拡大した。レーザ2焦点流速計を構成するための上流側焦点および下流側焦点が結像し、ファイバ先端のイメージである焦点間距離約  $0.5\text{mm}$  で結像していることを確認した。本課題では、製作上に理由によりコア径  $200\mu\text{m}$  の石英ファイバを用いたが、焦点部分の集光度は十分ではなかった。より小さなコア径のファイバを適用するなどして光学的SN比を改善することが今後の課題である。

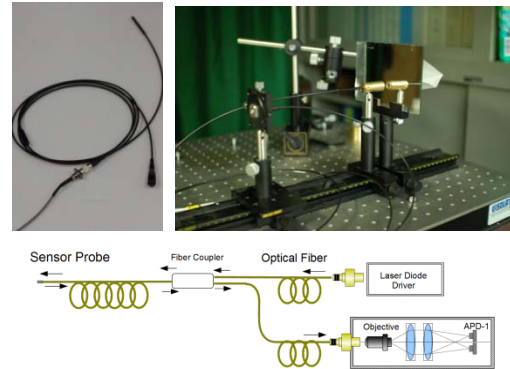


図1 試作バンドルファイバおよび光学構成

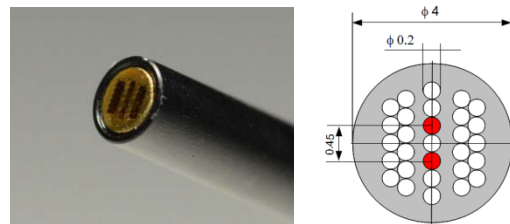


図2 バンドルファイバ先端部詳細



図3 2焦点の結像状況

#### (2)FPGAを用いた専用ハードウェアの構築

ディーゼル噴霧は高数密度であるため、非常に多くの流速・粒径データを高速にサンプリングする必要がある。従来のホストコンピュータを用いたサンプリングシステムでは、

高速にデータを処理できず、サンプリングの取りこぼしを生じてしまう。また、本課題で開発する多点計測では、計測点分だけデータ数が増えるので、ホストコンピュータを介さず、大量のサンプリングデータを高速処理できる専用ハードウェアの構築が必要である。

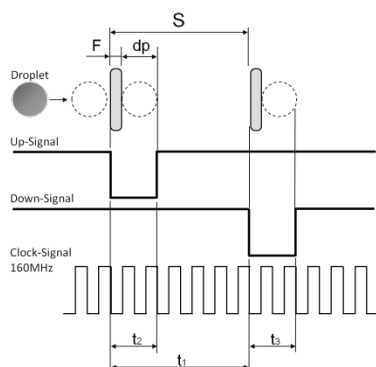


図4 流速・粒径計測原理

図4に本研究で適用する2焦点法による流速および粒子径の計測原理を示す。粒子が焦点部分を通過する際の飛行時間 $t_1$ および上流焦点の散乱光発光時間 $t_2$ 、下流焦点の散乱光発光時間 $t_3$ を計測する。散乱光発光信号は高速オペアンプによりTTLレベルまで引き上げられ、デジタル信号として処理される。焦点間距離 $S$ および焦点直径 $F$ は実験定数であり、飛行粒子の流速 $u$ および粒子径 $d_p$ は以下の式により算出する。

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

$$d_p = u \cdot t_2 - F \quad (2)$$

計測データがデジタル信号化されているので、データサンプリングハードウェアとしてFPGA(Field Programmable Gate Array)を用い、サンプリングレートの高速化を狙った。図5に開発した専用ハードウェアを示す。サンプリングボードとしてPSI社製SX-USB2を用い、論理回路はVerilog-HDLにて記述した。データスループットを上げるために、最少ステップで直結したSSRAMへ書き込む論理回路とし、最大15MHzのサンプリングレートを実現できた。実例として図6にディーゼル噴霧を計測した際の計測結果を示す。噴射期間0.6msで周期的に噴射されるディーゼル噴霧のサンプリング時刻を記録するため、噴射信号を同時に取り込み、横軸に示す時間は2msでリセットする回路とした。縦軸は焦点を通過した信号のデータ数を示し、図中の黒印は個々の散乱粒子信号を示す。本システムでは、1回の噴射あたり約400個の散乱光

信号を処理できており、個々の散乱粒子信号の時間間隔最小値は理論上限15MHzに近くなっていた。また、図中の赤丸印は、従来のホストコンピュータを用いた際のサンプリング結果であり、噴射1回あたりのサンプル数は僅か10個程度である。本課題で開発したFPGAによる専用サンプリングシステムは、時間平均で40倍、最大で1,000倍の高速サンプリングを実現できた。



図5 FPGAを用いた専用ハードウェア

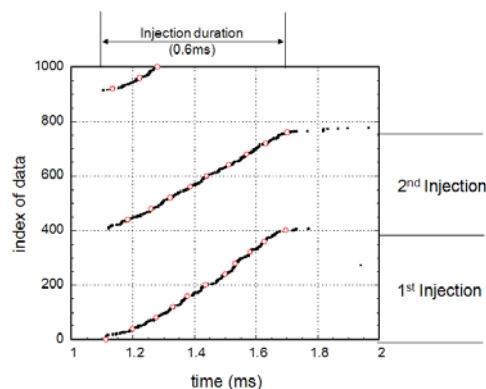


図6 噴霧計測におけるサンプリング数の時間変化

### (3) 質量分布解析手法の構築

計測対象であるディーゼル噴霧は、高速な粒子が分裂および合体を繰り返しながら下流へと流れる非定常流である。特に噴霧質量の空間的分布は燃焼に大きく影響する重要なパラメータであり、定量的計測評価手法の確立が必要である。本計測システムが高速サンプリングレートであるという特徴を活かして、計測された粒子の流速、粒子径および粒子計測時刻データより噴霧質量の空間分布を解析する方法を開発した。

図7にディーゼル噴霧の計測点を示す。噴霧軸下流5mmから25mmにかけて6点、半径方向に5点を設けて解析を行った。コモンレールインジェクタのレール圧は40MPa、噴射期間は1msとした。図8に噴孔より25mmにおける粒子の速度および粒子径データの時

間変化を示す。噴霧先端部でも速度データは幅広く分布し、噴射期間の間はほぼ速度分布は一定であるが、噴射期間終了後は急激に速度が減少し複雑な噴霧構造を示している。得られたデータは、速度、粒子径および粒子の焦点通過時刻であり、粒子間の時刻差に速度を乗じたものが粒子間距離 $L_d$ であり、粒子の空間的な数密度 $N_d$ は以下の式により求められる。

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

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

図9は粒子数密度の空間分布を示しており、分裂現象が活発な噴霧先端部および噴霧周辺部において粒子数密度が大きい。ここで、測定点を中心とした代表測定ボリューム $V_p$ および液体の密度 $\rho$ を考慮すれば、空間的な粒子質量分布は以下の式により得られる。

$$m_f(z, t) = \rho \cdot V_p(z, t) \cdot u(z, t) \cdot N_d(z, t) \quad (5)$$

図10に噴霧粒子の質量分布を示す。噴霧先端部に質量分布が集中している様子、また噴霧中心部から外縁部に向かって質量分布が減少していることが分かる。図の積分値は噴射量に相当し、実噴射量の5%の精度で質量分布を算出することができた。

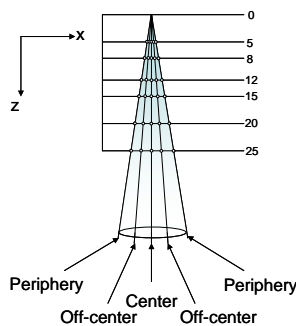
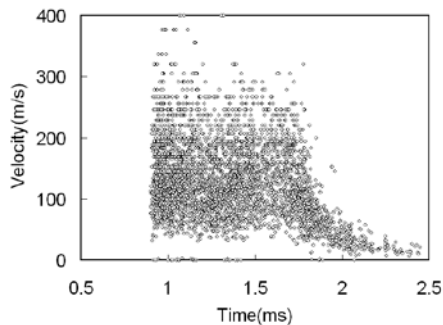
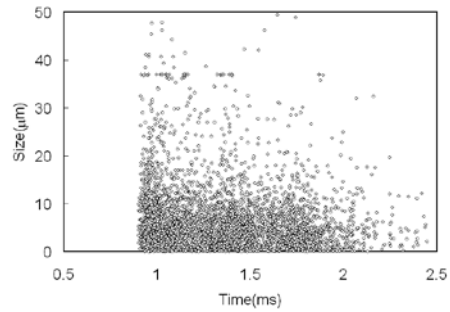


図7 ディーゼル噴霧の計測点



(a) 粒子速度



(b) 粒子径

図8 粒子速度および粒子径の時間変化 (z=25)

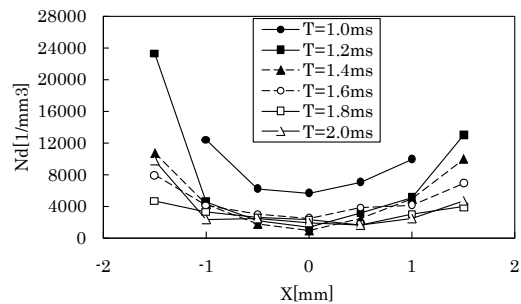


図9 粒子数密度の空間分布 (z=25)

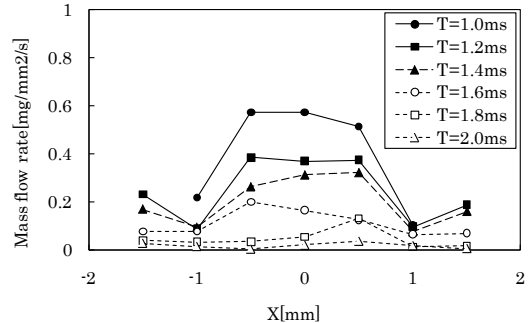


図10 粒子質量の空間分布 (z=25)

## 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9件)

- ① 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射ノズル噴孔近傍の液滴質量分布の評価, 日本機械学会論文集, 査読有, B 編第 77 巻 774 号, 2010, pp. 274-281
- ② D.Sakaguchi, S.Yamamoto, H.Ueki and M.Ishida, Study of Heterogeneous Structure in Diesel Fuel Spray by Using Micro-Probe L2F, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.5, No.1, 2010, pp.75-85



- ③ D.Sakaguchi, S.Yamamoto, H.Ueki and M.Ishida, 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, 2010, pp.63-74
- ④ 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, アミダオルウォレ, マイクロプローブ L2F によるディーゼル噴霧コア部における液滴数密度の瞬時計測, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.6, 2008, pp.137-142
- ⑤ 植木弘信, 石田正弘, 坂口大作, アミダオルウォレ, ディーゼル噴霧コア部液滴の分裂に及ぼす噴射圧の影響~L2F によるメガヘルツデータレート計測~, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, 2008, pp.53-58
- ⑥ H.Ueki, M.Ishida, D.Sakaguchi and O.Amida, Evaluation of Weber Number of Droplets in Dense Region of Diesel Fuel Spray, Proceedings of the THIESEL 2008 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, 2008, pp.101-112
- ⑦ D.Sakaguchi, H.Ueki and M.Ishida, Time-resolved measurement of droplets in core region of diesel fuel sprays by micro-probe L2F with mega-hertz data acquisition, Proceedings of the 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2008, Paper No. 11.2.1
- ⑧ H.Ueki, M.Ishida, D.Sakaguchi and O.Amida, Measurement of Number Density Distribution in Dense Region of Diesel Fuel Spray by Micro-Probe L2F, Proceedings of The 7th COMODIA 2008, pp.625-632
- ⑨ H.Ueki, M.Ishida, D.Sakaguchi and O. Amida, Measurement of High-Number-Density Droplets in Diesel Spray using Micro-Probe L2F with Mega-Hertz Data Acquisition, SAE Diesel Fuel Spray Injection and Sprays 2008 SP-2183, pp.79-88
- [学会発表] (計 27 件)
1. 白川拓也, L2F による高圧場ディーゼル噴霧挙動の研究, 日本機械学会九州支部第 64 期総会講演会, 2011, 福岡
  2. 山本昌平, L2F 計測および KIVA 解析によるディーゼル噴霧液滴の分裂合体過程の研究, 第 21 回内燃機関シンポジウム, 2010, 岡山
  3. S.Yamamoto, Effect of Back Pressure on Droplet Size Near Diesel Injection Nozzle, ILASS-Asia, 2010, 韓国
  4. K.Komada, Measurement of Mass Distribution in Diesel Fuel Spray by Using Micro-probe L2F, ILASS-Asia, 2010, 韓国
  5. 白川拓也, ディーゼル機関燃料噴霧における渦構造の研究, 日本機械学会流体工学部門講演, 2010, 山形
  6. 山本昌平, マイクロプローブ L2F を用いた高圧場ディーゼル噴霧液滴の分裂・合体の研究, 自動車技術会 2010 年秋季大会, 2010, 福岡
  7. 駒田佳介, ディーゼル噴霧液滴の速度とサイズに及ぼす雰囲気圧力の影響, 自動車技術会 2010 年秋季大会, 2010, 福岡
  8. 北村恭平, マイクロプローブ L2F によるディーゼル噴霧液滴の分裂合体過程の研究, 日本機械学会年次大会, 2010, 名古屋
  9. S.Yamamoto, Investigation of Breakup Process of High-Number-Density Droplets by Laser Measurement and Numerical Simulation, the 11th Joint Symposium of Nagasaki University and Jeju National University on Science and Technology (JSST2010), 2010, 韓国
  10. 坂口大作, ディーゼルインジェクタ噴孔近傍噴霧液滴挙動に及ぼす雰囲気圧力の影響, 日本自動車技術会 2010 年春季大会, 2010, 横浜
  11. 内島諒一, ディーゼル噴霧液滴の分裂・合体に及ぼす噴射率空間分布の影響, 日本機械学会九州支部第 63 期総会講演会, 2010, 熊本
  12. 松崎泰樹, ディーゼル噴霧液滴の分裂・合体に及ぼす液滴体積占有率の影響, 日本機械学会九州支部第 63 期総会講演会, 2010, 熊本
  13. 駒田佳介, L2F を用いたディーゼル燃料噴射ノズル噴孔近傍の液滴質量分布の評価, 第 18 回微粒化シンポジウム, 2009, 福岡
  14. 北村恭平, 相関スロット法を用いたディーゼル燃料噴霧における渦構造の研究, 第 18 回微粒化シンポジウム, 2009, 福岡
  15. 坂口大作, マイクロプローブ L2F による噴霧の不均一構造の研究, 日本機械学会第 87 期流体工学部門講演会, 2009, 名古屋
  16. 内島諒一, ディーゼル燃料噴霧における液滴数密度の評価, 日本機械学会九州支部長崎講演会, 2009, 長崎
  17. 北村恭平, L2F による高数密度ディーゼル噴霧の質量分布計測, 日本機械学会九州支部長崎講演会, 2009, 長崎
  18. 坂口大作, マイクロプローブ L2F によるディーゼル噴霧の渦構造の研究, 第 20 回内燃機関シンポジウム, 2009, 東京
  19. 村上洗貴, 第 78 回マリンエンジニアリ

- ング学術講演会, 2009, 長崎
20. 中島成吾, マイクロプローブ L2F によるディーゼル噴霧内質量分布の評価, 日本機械学会九州支部第 62 期講演会, 2009, 福岡
  21. 築瀬祥隆, ディーゼル噴霧コア部液滴の追いつき・追い越し特性の評価, 日本機械学会九州支部第 62 期講演会, 2009, 福岡
  22. 植木弘信, ディーゼル噴霧高数密度液滴群における追いつき・追い越しの時間空間特性, 第 17 回微粒化シンポジウム, 2008, 東京
  23. H.Ueki, Evaluation of Number Density of Droplets in Dense Region of Diesel Sprays Based on Single Droplet Sensing, the 12th Annual Conference of ILASS-Asia, 2008, 東京
  24. 村上洗貴, 燃料噴霧の L2F 計測に基づくディーゼル燃焼解析, 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008, 京都
  25. D.Sakaguchi, Study of Heterogeneous Structure in Diesel Fuel Spray by Using Micro-Probe L2F, The 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008, 札幌
  26. 坂口大作, ディーゼル噴霧コア部の液滴の追いつき・追い越し特性, 日本機械学会岡山講演会, 2008, 岡山
  27. 坂口大作, 植木弘信, 石田正弘, アミダオルウォレ, マイクロプローブ L2F によるディーゼル噴霧コア部における液滴数密度の瞬時計測, 自動車技術会学術講演会, 2008, 横浜

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂口 大作 (SAKAGUCHI DAISAKU)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 7 0 2 4 4 0 3 5

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし