

## プロパンガス噴流の流動と濃度計測

南 拓海<sup>\*1</sup>, 田端 道彦<sup>\*2</sup>

### Measurement of Flow Field and Fuel Concentration of Propane Gas Jet

Takumi MINAMI<sup>\*1</sup>, Michihiko TABATA<sup>\*2</sup>

Experiments were conducted using propane for the characteristics of the gaseous jet in the direct injection gasoline engine and the experiment using the propane. The concentration distribution of the propane jet when injected from the gas injector into the pressure vessel of the high pressure field is measured by the laser induced fluorescence method. The flow state was measured using the particle image correlation method. Therefore, numerous vortex structures were observed at the boundary of the gaseous jet. Furthermore, when the ambient pressure was increased, the number of vortices increased and the size of the vortex became finer. Also, since the fluorescence intensity decreases along the downstream side of the jet, a vortex structure that takes in the ambient air is observed.

Keywords: Propane Gas Jet, Flow Field, PIV, Fuel Concentration, LIF

#### 1. はじめに

地球環境やエネルギー問題への対応として、乗用車で大半を占めるガソリン車のエンジン効率の改善が注目されている。直噴ガソリン噴射を用いた高圧縮化、成層希薄燃焼、予混合圧縮着火燃焼など、高効率化へ向けた技術開発が進められている<sup>(1)</sup>。直噴ガソリン機関での噴霧特性及び、流動状態は、その後の混合気形成過程を大きく左右するため、多くの研究が進められてきた<sup>(2)</sup>。

特に、成層希薄燃焼を狙った場合、燃料噴射時期が遅角化するため、高温の燃焼室内に噴射されたガソリン噴霧の先端は、蒸発したガソリン蒸気の混合ガスになっていると考えられる。この混合ガスに点火する場合、ガスの濃度分布と流動状態（乱流状態）が重要である。

本研究では、ガス噴流の噴流先端での濃度分布と流動状態との相対的な関係を明らかにするため、プロパンガスを実験で使用する。これはガソリン直噴エンジンにおいて、圧縮行程後半に燃料を直噴すると、筒内は高温かつ高圧であるため、直噴された燃料の先端部

は、ガスとなり混合していくことがわかっている。このことから、プロパンガス噴流を計測することは、直噴された燃料先端部の混合気形成過程を解明する際に有効であると考えられる。高圧場の圧力容器内に噴射した際のプロパン噴流の濃度状態をレーザ誘起蛍光法(LIF)にて計測した。また、プロパン噴流境界での混合の流動状態を二次元レーザシート光系を用いた粒子画相関法(PIV)にて計測した。

#### 2. プロパンガス噴流の流動計測

##### 2.1 粒子画像相関法を用いた実験装置

図1に実験装置の概略を示す。Ar イオンレーザを光源とし、レーザ光を三枚のシリンドリカルレンズを用いシート状にして、圧力容器内に照射する。容器内にトレーサ粒子を均一に充満させた窒素ガスを充填させる。トレーサ粒子として粒径2 [μm]のシリコンレジンパウダを使用した。噴射燃料としてはプロパンを使用し、圧力容器上部に設置したガス噴射弁よりプロパンを圧力容器内に噴射する。雰囲気窒素ガスに浮いているトレーサ粒子からの散乱光をレーザシート光面に対し垂直

原稿受付 2017年4月28日

<sup>\*1</sup> 近畿大学大学院 システム工学研究科 システム工学専攻 博士前期課程 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

<sup>\*2</sup> 近畿大学工学部 機械工学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

E-mail tabata@hiro.kindai.ac.jp

連絡先: 田端道彦 (研究代表者)

に設置した高速度カメラで撮影し PIV 解析した。ガス噴流の噴射期間 10 [ms], 噴射圧力と雰囲気圧力差を噴射差圧  $\Delta P_{inj}=0.4$  [MPa] 一定で, 雰囲気圧力を変化させた。撮影速度は 15,000 [fps] とした。

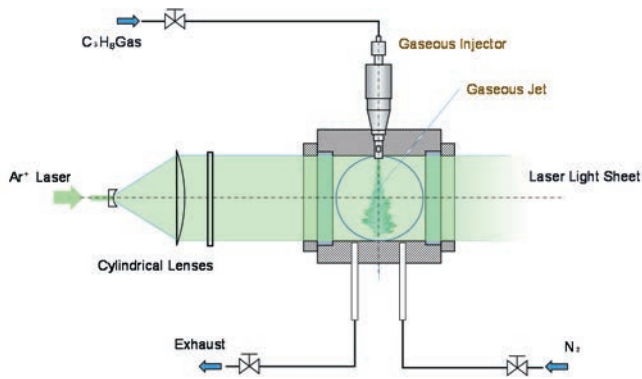


図 1. Experimental equipment for measuring flow field of gaseous jet

## 2.2 プロパンガス噴流の流動計測

図 2 に雰囲気圧力  $P_a=0.1$  [MPa] が大気圧で噴射差圧  $\Delta P_{inj}=0.4$  [MPa] のときのガス噴流の発達状態を示す。噴射開始後  $t=0.2$  [ms] のとき噴流先端で左右対称な二つの渦が確認できる。それらの渦が  $t=0.5\sim1.1$  [ms] では、噴流の発達に伴い、噴流下流に移動しながら大きくなっている。 $t=1.8$  [ms] 以降になると、噴霧先端部に形成されていた大きな渦が次第に細かい渦に崩壊していくことがわかる。

図 3 に、図 2 の画像を PIV 処理した速度ベクトル分布画像を示す。噴流の境界付近の流動状態を観察するために、 $0\sim2.0$  [m/s] の範囲の速度ベクトルの長さで濃淡で示している。なお、噴流中心部の白抜きの領域は、噴流速度が速すぎるために撮影速度の制限で速度を解析できない領域である。図 3 から噴流先端で形成された 2 つの噴流の外側の回る大規模な渦構造を観察でき、噴流の発達とともに下流方向に大きくなることがわかる。その後、噴流先端では大規模な渦が崩壊し、小規模な渦構造となる。また噴流上流でも周囲から噴流に取り込まれるように小規模な渦が増加することがわかる。

図 4 に渦度分布画像を示す。噴流中心部の渦度は、噴流中心部の速度が計測できていないため、計算上高い渦度となっている。噴流周辺部の渦度を観察すると噴流周囲の渦度が高くなっており、周囲気体が噴流に

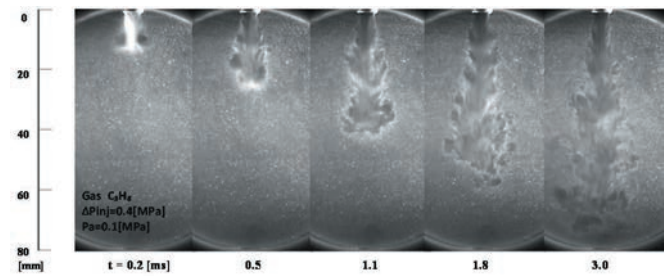


図 2. Development of gaseous jet at ambient pressure of 0.1 MPa

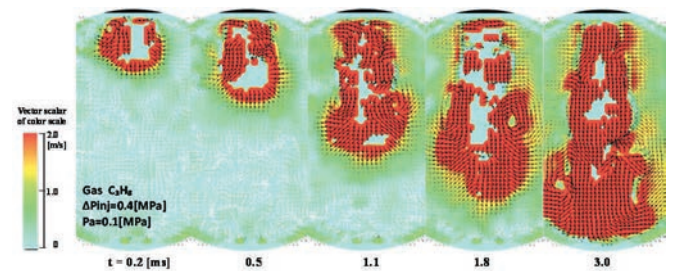


図 3. Velocity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.1 MPa

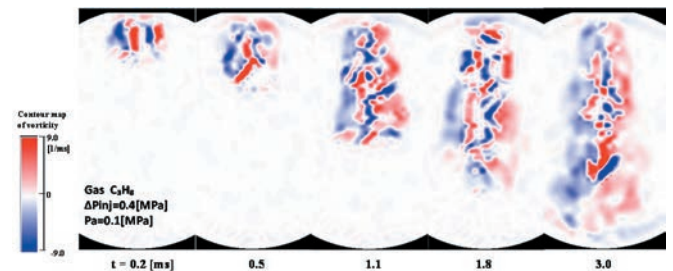


図 4. Vorticity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.1 MPa

巻き込まれる渦が形成されている。また、噴流先端部の渦度が相対的に高く渦度を示す領域も拡大している。

図 5 に雰囲気圧力が  $P_a=0.3$  [MPa] の場合のガス噴流の発達状態、図 6 に速度分布画像、図 7 に渦度分布画像を示す。図 5 及び 6 より、 $t=0.5$  [ms] のとき、噴流先端の左右端で渦が形成され、 $t=1.1\sim1.7$  [ms] かけて、噴流の発達とともに大きくなっている。図 5, 6 の雰囲気圧力  $P_a=0.1$  [MPa] の場合と比較して、噴流先端部の渦の規模は小さくなっていることがわかる。これは、雰囲気圧力が高くなり雰囲気の密度が高くなったため、噴流の流動が抑制されるためである。噴流上流部は、雰囲気圧力が低い場合よりも噴流に巻き込まれるような小規模な渦が噴流境界に多数観察される。図 7 の渦度の分布でも、渦度が高い領域が、噴流先端部や噴流



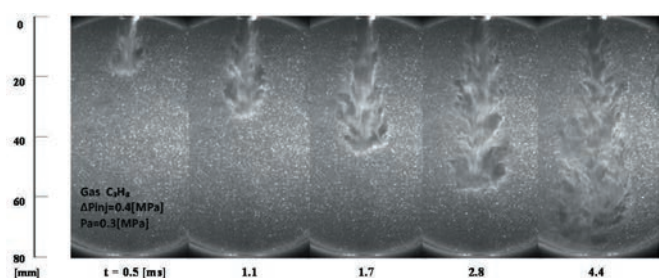


図 5. Development of gaseous jet at ambient pressure of 0.3 MPa

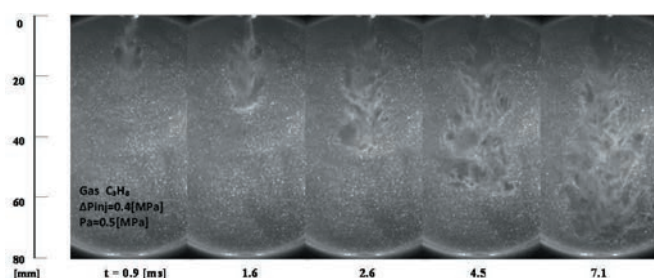


図 8. Development of gaseous jet at ambient pressure of 0.5 MPa

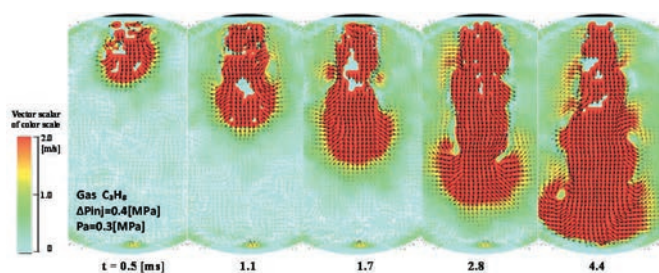


図 6. Velocity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.3 MPa

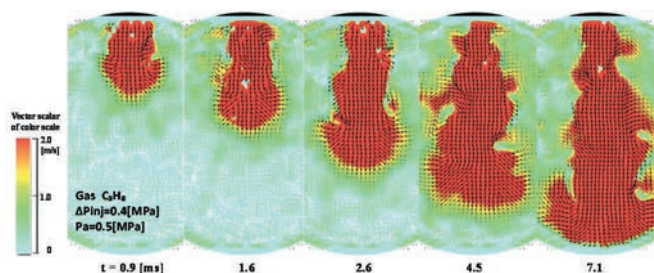


図 9. Velocity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.5 MPa

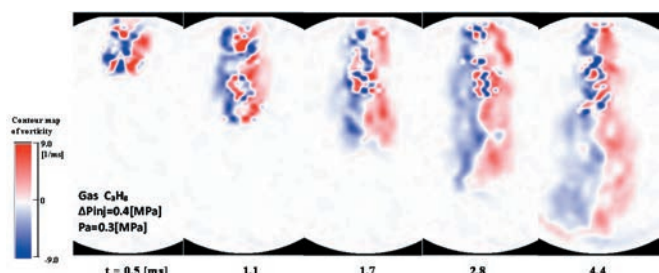


図 7. Vorticity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.3 MPa

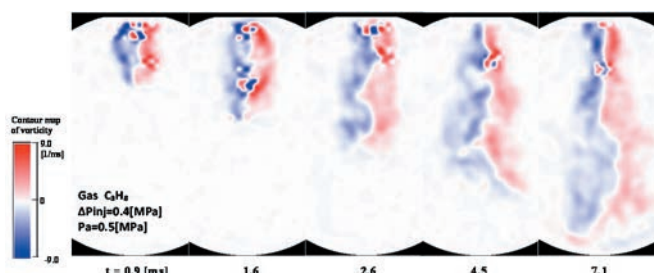


図 10. Vorticity distribution of gaseous jet at ambient pressure of 0.5 MPa

周辺部に広く分布していることがわかる。

同様に、図 8 に雰囲気圧力が 0.5 [MPa] のときのガス噴流の発達状態を、図 9 に速度分布画像を、図 10 に渦度分布画像を示す。さらに雰囲気密度が高くなった場合、噴流の流動が抑えられ、噴流先端の大きな渦の崩壊も早く起こる。また、噴流周辺部の渦の数も、噴流の発達の初期段階から多く観察され、その規模も微細化していることがわかる。図 10 の渦度の分布からも、図 7 同様に渦度が高い領域が、噴流先端部や噴流周辺部に広く分布していることがわかるが、雰囲気密度が低い場合と比較して、噴流根元に渦度が強くなっている。これは雰囲気密度の増加により、高い密度の周囲気体が噴流内部に取り込まれるようになることを示している。

### 3. プロパンガス噴流の濃度分布計測

#### 3.1 レーザ誘起蛍光法を用いた実験装置

図 11 に本実験で使用した実験装置の概略を示す。この実験装置は、プロパンガス、圧力容器、ガスインジェクタ、アセトン添加装置、Nd:YAG レーザで構成されている。プロパンガスをまずアセトン添加装置に流入させ温度調節器と電熱ヒータを用いてアセトンの添加比率を調整した。アセトンが添加されたプロパンガスを圧力容器上部に設置したガスインジェクタより圧力容器中に噴射した。Nd:YAG レーザからは 266 [nm] の波長のレーザー光を発振し、圧力容器中のプロパンガスに照射した。それによりプロパンガス中のアセトンをレーザーにより励起させる。レーザー光により励起した際に起こるアセトンの蛍光を圧力容器に対して垂直方向に

設置したフィルタと I.I. (イメージインテンシファイア) 付き冷却 CCD カメラを使いプロパンガス噴流の 2 次元断面の混合気分布を計測した。

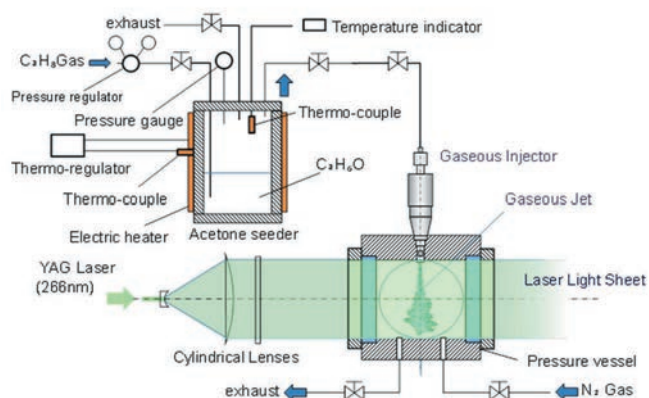


図 11. Experimental apparatus for measurement of concentration distribution of gaseous jet

### 3.2 プロパンガス噴流の濃度分布計測

図 12 には、レーザ誘起蛍光法で撮影された画像と比較するため同じ噴射条件で撮影したシュリーレン画像を併記した図を示す。図 12 に噴射弁中心軸(図 12[b]AA)と、噴孔から 20 [mm] の位置での半径方向(図 12[b]BB)の噴流断面における蛍光強度分布を示す。

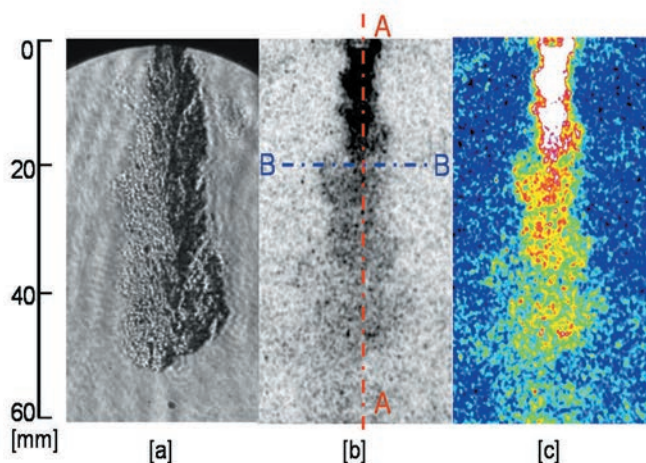


図 12. Schlieren and LIF image of  $C_3H_8$  gas

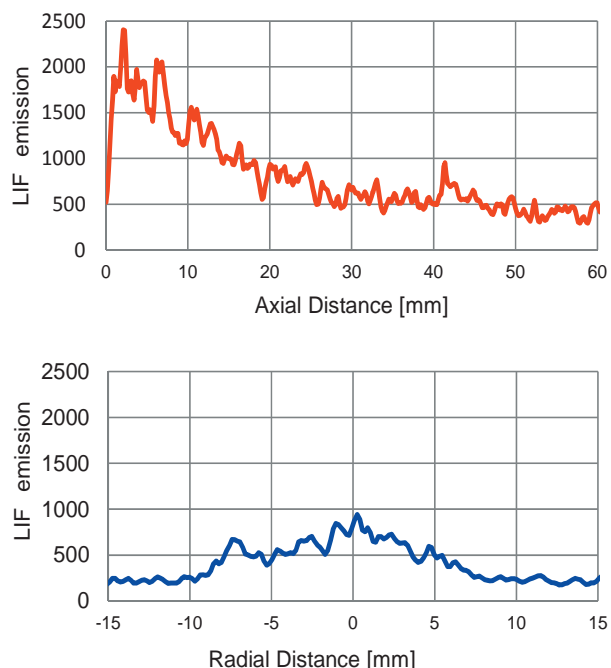


図 13. LIF emission distribution on axial and radial distances

図 13 の[a]がシュリーレン画像, [b]が撮影された LIF 画像を白黒反転した画像, [c]が LIF 画像を疑似カラー表示した画像である。シュリーレン法では、ガスの密度勾配を表しており測定原理上、光軸の積分情報となり、噴流の内部構造や、ガス濃度の 2 次元断面の情報を画像からえることはできない。レーザ誘起蛍光法で撮影された[b], [c]の画像はアセトンからの蛍光強度分布が示している。アセトンはプロパンガスに定量添加されているため、蛍光強度はガス濃度と一定の関係がある。蛍光強度が高ければ、ガス濃度は高い。

シュリーレン法とレーザ誘起蛍光法にて撮影された画像を比較すると、シュリーレン法で撮影された画像では、噴流境界が滑らかに見えるが、LIF 画像ではかなり凹凸が見られることが分かる。これは、噴流の発達とともに、噴流に取り込まれる周囲気体の流入により噴流境界面に渦が形成されていることを示している。その渦流動は、噴流下流に行くにしたがって、全体的には大規模化しているが、蛍光強度は下り、蛍光強度分布が離散的になることが分かる。これは、大きな渦が噴流の発達とともに下流方向で崩壊し小規模な渦の集合体となっているものと考えられる。

図 13 の噴射弁中心軸方向の噴流断面における蛍光強度分布より噴口から噴出された噴流の蛍光強度は高く

噴流下流に進むにつれ、次第に減少していくことが分かる。これは、噴流の発達とともに周囲のガスを噴流が巻き込みながら混合するためであり、噴流先端部の混合がかなり進んでいることを示している。図 13 の噴孔から 20 [mm] の位置での半径方向の噴流断面における蛍光強度分布より半径方向の分布も、噴流外縁方向に、蛍光強度は減少しており、噴流外縁部で周囲空気との混合が促進されていることが分かる。-7, 5[mm] の位置にて蛍光強度に山が見えるのは、周囲空気を取り込む渦の形状が捉えられているためである。

さらに同条件で図 3 の PIV 解析画像と図 12 の LIF 画像を比較してみると図 12 の LIF 画像の蛍光強度分布が噴流が発達するにつれ、蛍光強度が減少している領域では PIV 解析画像を見ると渦構造が見られる。また、図 13 の噴射弁中心軸方向の噴流断面における蛍光強度より噴孔からの噴霧到達距離 40[mm] のとき噴流外縁方向に蛍光強度が減少していることから噴流外縁部で周囲空気をを取り込む様子が撮影されている。これは図 3 の PIV 画像から噴霧到達距離が 40[mm] 付近の噴流外縁部に渦構造が観察されることからわかる。

#### 4. まとめ

圧力容器を用いて、レーザ誘起蛍光法によるプロパンガス噴流の 2 次元濃度分布計測と粒子画像相関法によるプロパンガス噴流の流動計測を行った結果以下のことがわかった。

- (1) 噴射初期に噴流先端に比較的大規模な渦が形成され、噴流の発達とともに、噴流下流に移動し、次第に大規模な渦は崩壊していく。また、噴流周囲部には周囲気体を巻き込むような小規模な渦が多数形成される。
- (2) 雰囲気圧力が増加すると、噴射初期の大規模な渦構造は小さくなり、噴流発達の早い段階で、噴流先端や周囲部で多数の小規模な渦が広い範囲で観察されるようになる。
- (3) 噴流境界面の渦度分布は、雰囲気圧力が高くなるにつれ、噴流上流部の渦度が高くなる。
- (4) 噴流根本部は、明確な渦形状の蛍光強度分布が確認でき、周囲空気の導入が進んでいることが分かった。
- (5) 噴流の下流に沿って渦構造は次第に離散的となり小規模な渦の集合体となり、蛍光強度が低下する。

#### 謝辞

本研究で使用した実験装置の一部はマツダ株式会社より提供して頂いた。また、実験に協力頂いた熱工学研究室学部生 石丸祐一君に対し、ここで謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 山川正尚, 養祖隆, 藤川竜也, 西本敏朗, 和田好隆, 佐藤圭峰, 横畑英明, “高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発”, 自動車技術会論文集 Vol.43, No.1 (2012), pp.81-87
- (2) 植木毅, 後藤守康, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎, “高圧雰囲気場におけるガソリン直噴インジェクタノズルの噴霧特性解析”, 自動車技術会, 2016 年秋季大会学術講演論文集 CD (2016-10)