非定常噴霧の構造に関する研究*

(第2報, 燃料蒸気の濃度・速度分布と着火領域の2次元可視化)

小 酒 英 範^{*1}, 神 本 武 征^{*2}

A Study on the Structure of Transient Sprays (2nd Report, 2-D Visualization of Fuel Vapor Concentration, Velocity and Ignition Region)

Hidenori KOSAKA^{*3} and Takeyuki KAMIMOTO^{*3} Tokyo Institute of Technology, Dept. of Control and Systems Engineering,
2-12-1 Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

Distributions of fuel vapor concentration, fuel vapor velocity and ignition region in a transient fuel free spray in a rapid compression machine were visualized two-dimensionally by a laser sheet scattering technique called as Silicone oil droplets Scattering Imaging (SSI) method. The residual silicone oil droplets suspended in fuel vapor are illuminated by a sheet of light from copper vapor laser flushing at 20 kHz, and the blight scattering from silicone oil droplets was imaged by a high speed camera synchronized to the laser. The distribution of fuel vapor velocity was analyzed from sequential SSI images by a cross-correlation PIV technique. The ignition region in a spray could be detected as dark regions where the silicone oil droplets were vaporized by local heat release due to ignition. Distributions of fuel vapor concentration, velocity and ignition region in a transient spray obtained revealed that ignition starts behind the head vortices in a spray where surrounding air is entrained into spray strongly.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Ignition, Fuel Vapor Concentration, 2-D Visualization, Silicone Oil Droplets Scattering Imaging

1. まえがき

ディーゼル機関の燃焼の基礎となる非定常燃料噴霧火炎では, 噴霧により形成される燃料濃度, 温度の不均一な分布が燃焼特性と機関からの有害物排出特性に大きな影響を与える. これまで燃料噴霧の不均一構造について主に非蒸発噴霧を対象に実験的研究がなされ^(1,2), これらの研究により非蒸発噴霧では燃料液滴群が枝状の極めて不均一な分布を有している事が明らかにされてきた⁽¹⁾. しかし, 着火や燃焼に直接関係するであろう蒸発噴霧における燃料蒸気濃度分布の不均一性や燃料蒸気の運動についてはほとんど調べられていない.

非定常燃料噴霧における着火位置は, その後の燃焼特性に大きな影響を与える因子の一つであり, 着火直前の燃料蒸気濃度と温度に強く支配される. 従来から着火過程について調べられてきたが, 高速度直接写真法やシュリーレン法^(3,4)では着火位置に関する光路積分情報しか得られず, これを噴霧内の燃料蒸気の運動や不均一構造に関連付けて考察する事は難しかった.

著者らは前報⁽⁵⁾にて, シリコンオイル粒子散乱光法と呼ばれる噴霧内燃料蒸気濃度分布を2次元可視化する

手法を新たに考案した. この方法は検出光強度が蛍光法の約 1000 倍と S/N 比が高いという特徴を有し, これにより従来は不可能であった噴霧内燃料蒸気の高速度 2 次元可視化が可能となった.

本研究では, 同手法を高温高压窒素雰囲気中の蒸発自由噴霧に適用して蒸気濃度分布を計測し, また相互相関 PIV 法により燃料蒸気速度分布を計測して蒸発噴霧内の不均一構造と渦運動の関係を調べている. ついで本手法を高温高压空気雰囲気中の自由噴霧に適用し, 噴霧内の着火領域を高速度 2 次元可視化し, 混合気形成過程と着火領域の関係を調べる.

2. 可視化方法と実験装置

2・1 シリコンオイル粒子散乱光法⁽⁵⁾

噴霧内燃料蒸気濃度の 2 次元可視化にはシリコンオイル粒子散乱光法(以後 SSI 法と呼ぶ)を用いた. 基準燃料である 0- ソルベント ($C_{12}H_{26}$:21.4 %, $C_{13}H_{28}$:51.6 %, $C_{14}H_{30}$:22.0 %)にシリコンオイルを 5 %溶解し, これを高温雰囲気中に噴射すると不揮発性のシリコンオイルは蒸発せずに液滴として燃料蒸気中に浮遊する. このシリコンオイル微粒子を散乱トレーサとして用い, レーザーシートを噴霧に入射した際にシート光上の微粒子から発せられる散乱光を撮影して噴霧内燃料蒸気の 2 次元分布を可視化する.

* 原稿受付 1999 年 5 月 6 日.

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1).^{*2} 正員, 東海大学工学部 (〒259-1292 平塚市北金目 1117).

E-mail: hkosaka@ctrl.titech.ac.jp

図1に撮影光学系の概要を示す。光源には銅蒸気レーザー(Oxford Lasers, CU15-A, 波長: 510.6/578.2 nm, 出力: 1.3 mJ/pulse)を用いた。閃光周波数は 20 kHz である。レーザー光は3枚の円筒レンズにより厚さ 0.2 mm のシートに整形されたのち燃焼室内に導かれ、噴霧中心軸を含む断面を照射する。シート光上のシリコンオイル微粒子からの散乱光は、シート光に対し直角方向から高速度カメラ(Nac, E10)あるいは高速度イメージコンバータカメラ(Nac, ULTRANAC)により撮影する。両カメラとも銅蒸気レーザーの閃光に同期しており、撮影速度は 8,000fps(高速度カメラ)と 20,000 fps(イメージコンバータカメラ)である。

2・2 着火領域の2次元可視化 シリコンオイル微粒子が浮遊する噴霧内で混合気が着火すると、その領域では着火反応による熱発生によりシリコンオイル微粒子が蒸発する。したがって本手法では、着火領域は散乱光が検出されない暗領域として捉えられる。図2に噴口から 40 - 60 mm における高温高压窒素中(左)と高温高压空气中(右)の噴霧断面からの散乱光の2値化画像を示す。右の燃焼噴霧内に見られる暗領域は時系列的に散乱光画像を観察する事により着火によりシリコンオイルが蒸発したためと判定され、これを着火領域とした。

シリコンオイルは酸化過程でホルムアルデヒドを発生し、これが噴霧の着火過程に影響を与える恐れがある。この点を小形急速圧縮装置(ボア: 60 mm, ストローク: 90 mm, 最大圧縮比 17.3)を用いた噴霧の着火遅れ計測により調べた。着火遅れは測定した燃焼容器内圧力の時間変化から、着火の発熱反応による発生熱量が燃料の吸熱量を上回る時期を着火と定義し求めた⁽⁶⁾。

図3にn-デカンとn-デカンにシリコンオイルを5%

Fig. 1 Optical setup for PLIF imaging

溶解した混合燃料の場合の着火遅れをアレニウスプロットする。燃料噴射圧力は 100 MPa, 雰囲気圧力は 4.2 MPa である。結果をみると、質量割合で 5 % シリコンオイルを溶解しても噴霧の着火遅れは雰囲気温度が 700 - 1100 K の範囲で影響を受けていない。また噴射開始から急激な圧力上昇に至る間の圧力変化のパターンもほとんど両燃料間に差異は無い。これらの事から本実験条件下ではシリコンオイルの溶解が噴霧の着火過程に影響を与えないと云える。なお着火の可視化実験では大形急速圧縮装置を用いたため燃焼による圧力上昇が小さく、圧力変化から着火遅れを計測する事が出来なかった。

Fig. 2 Binary images of scattering from silicone oil droplets in evaporating spray (left) and spray flame(right)

Fig. 3 Arrhenius plot of ignition delay for n-decane sprays showing no effect of silicone oil dissolved in n-decane as a scattering tracer

2・3 噴霧内燃料蒸気速度の2次元計測 50 μ s 間隔で得られた非燃焼蒸発噴霧断面の燃料蒸気の高速度可視化画像より相互相関 PIV 法を用いて燃料蒸気速度の2次元分布を求めた。相関を計算するための計算領域の大きさは 4.0 mm×4.0 mm であり、対応点を探索する探索領域の大きさは 5.1 mm(噴射方向)×3.5 mm(半径方向)である。本研究では噴霧幅と同程度のスケールの渦運動を捉えるために、計算領域の大きさは観察領域における噴霧幅と同程度から半分の大きさに相当するようにした。探索領域については、同一画像を用いて領域の大きさを変えて処理し、これ以上の大きさでは計算結果に大きな差異が認められないことを確認している。

2・4 実験装置と実験条件 実験装置には大形急速圧縮装置⁽⁷⁾を用いた。圧縮比は 14.7、上死点における燃焼室形状は直径 196 mm 厚さ 40 mm のパンケーキ型である。

燃料噴射装置には電磁油圧制御式高圧噴射装置⁽⁸⁾を用いた。この噴射装置の燃料噴射率は噴射期間中一定である。表 1 に実験条件を示す。雰囲気条件と噴口径、 d_0 は一定である。噴射圧力、 ΔP_{inj} は 48 - 91 MPa の範囲で変化させた。

3. 結果と考察

3・1 燃料噴霧の着火領域 図 4 と図 5 に噴射圧力が 50 MPa と 91 MPa の場合の高温高圧室素中の非燃焼蒸発噴霧(上)と高温高圧空気中の燃焼噴霧(下)の燃料蒸気の高速度2次元可視化画像をそれぞれ示す。可視化領域は噴口から 40 - 60 mm である。非燃焼蒸発噴霧の燃料蒸気分布を見ると、噴霧の先端から噴霧幅と同程度の大きさの燃料蒸気塊が分離し間欠的な蒸気濃度分布を形成している様子がわかる。

燃焼噴霧の蒸気可視化画像を見ると、噴射圧力が 50 MPa の場合には噴射開始後 0.72 ms、噴射圧力が 91 MPa の場合には 0.56 ms において、着火反応に伴う

局所的熱発生により噴霧先端上流部の噴霧の周囲部で散乱光が消失している事が観察できる。同条件下で 5 回撮影を行ったが、いずれも同様であった。噴射圧力の増加は局所熱発生時期を早めるが、その位置には影響をほとんど与えていない。噴射圧力の増加は燃料の微粒化と、燃料蒸気と周囲空気の乱流混合を促進するため、着火遅れ中の蒸発遅れと混合遅れが短縮されたものと考えられる。

噴射圧力が 91 MPa の場合、噴射開始後 0.95 ms に火炎からの自発光画像が検出される。この事は、SSI 法により従来の自発光検出による着火計測より早期に噴霧内の局所発熱領域を検出できる事を示している。

ここで観察された燃料蒸気濃度の間欠的な分布の成因と、燃料の不均一分布と着火位置の関係を調べるために、SSI 画像から噴霧中心軸上蒸気濃度の変動のストローハル数と蒸気速度の2次元分布を求めた。

3・2 噴霧内燃料蒸気濃度分布の不均一性 図 6 に SSI 画像噴霧中心軸上の無次元フィルム濃度の時間変化を示す。横軸には噴霧先端が可視化領域上流端の噴口から 45 mm の位置に到達した時刻からの経過時間を取り、縦軸には噴口からの距離を取り無次元フィルム濃度を白から黒のグレースケールで表示してある。黒に近いほどフィルム濃度が高くシリコンオイルからの散乱光強度が高い、すなわち燃料蒸気濃度が高いことを意味する。噴射圧力は 54 MPa である。

図 6 を見ると、燃料濃度が高い混合気塊が周期的に噴霧内を下流へ移動している様子がよく分かる。この濃混合気塊の噴口から 50 mm における通過周波数、 f_v 、と同位置における濃混合気塊の軸方向速度、 V_{50} 、噴霧幅、 W_{50} 、を画像より求め、図 7 に示した定義の濃混合気塊の通過ストローハル数、 S_t 、を算出した。これは次式に示すように、噴口から 50 mm における噴霧幅と濃混合気塊の間隔、 L_v 、の比に相当する。

$$S_t = \frac{f_v}{\left(\frac{V_{50}}{W_{50}}\right)} = \frac{\left(\frac{V_{50}}{L_v}\right)}{\left(\frac{V_{50}}{W_{50}}\right)} = \frac{W_{50}}{L_v} \quad (1)$$

図 8 に噴口から 50 mm における噴霧内濃混合気塊の通過ストローハル数、 S_t 、を、同位置における噴霧幅と混合気塊軸方向速度により定義したレイノルズ数、 Re 、に対しプロットする。また濃混合気塊間隔、 L_v 、も同時にプロットする。これより本実験条件下では、レイノルズ数によらずストローハル数は約 0.5 で一定であり、混合気塊間隔も 20 mm 程度で変化しな

Table 1 Experimental conditions

Injection conditions	
Nozzle	Single hole type
Orifice dia. : d_0	0.15 mm
Orifice length : L	0.6 mm
Fuel	C ₁₂ H ₂₆ : 21.4 % 0-solvent 95 % C ₁₃ H ₂₈ : 51.6 % C ₁₄ H ₃₀ : 22.0 %
	Silicone oil 5 %
Injection pressure : ΔP_{inj}	48 - 91 MPa
Surrounding conditions	
Pressure : P_g	2.8 MPa
Temperature : T_g	750 K

いことが分かる。ストローハル数がレイノルズ数によらず一定になることは、軸対称2次元单相噴流の大規模渦生成ストローハル数がレイノルズ数によらず 0.4 - 0.6 程度の値を取ることに^(9,10,11)に類似している。このことから、非定常蒸発燃料噴霧における燃料蒸気濃度分布の不均一性は、噴流の流体力学的な不安定性に起因していると考えられる。

3・3 噴霧内燃料蒸気の速度分布 図9に SSI 画像の散乱光強度分布(上)、これらの画像から相互相関 PIV 法により得られた噴霧内燃料蒸気速度の2次元分布(中)、噴霧先端に対する相対速度分布(下)を示

す。噴射圧力は 91 MPa である。t = 0.57 ms は SSI 画像にて着火が検出された時刻に相当する。図中 V_{tip} は噴霧先端軸方向速度である。相対速度ベクトル図中の大きな矢印は、大きなスケールの流れの方向を定性的に示したものである。絶対速度ベクトル分布(中)を見ると、噴霧先端では燃料蒸気が噴霧の中心から外向きに移動しており、先端より上流の噴霧周囲部では逆に噴霧中心に向かって蒸気が移動している事が観察できる。これを噴霧先端に対する相対速度分布図(下)でみると、噴霧先端に到達した燃料蒸気はその後噴霧の縁に沿って上流へ輸送され、上流部で再び噴霧内部へ導入されており、噴霧先端に大きな渦運動が認めら

Fig. 4 2-D images of scattering from silicone oil droplets in a cross section of an evaporating spray (top) and those of spray flame (bottom) ($\Delta P_{inj} = 50$ MPa)

Fig. 5 2-D images of scattering from silicone oil droplets in a cross section of an evaporating spray (top) and those of spray flame (bottom) ($\Delta P_{inj} = 91$ MPa)

Fig. 6 History of distribution of film density on central axis of SSI images in an evaporating spray

Fig. 7 Definitions of Strouhal number and Reynolds number for an evaporating spray

れる。この先端渦により蒸気が噴霧へ再導入されている部分の散乱光強度(上)を見ると、ここでは散乱光強度が低く混合気が希薄化されていることが分かる。これは先端渦運動により先端から輸送された燃料蒸気とともに周囲空気が噴霧内へ導入されるためである。

図4, 5にて観察された噴霧の着火領域が噴霧の最先端部より上流であることから、噴霧の着火過程と燃料蒸気の不均一分布と運動との関係を先端渦に対しラグランジュ的に描くと図10のようになる。噴霧内には噴流の不安定性に起因する周期的・間欠的な渦運動が存在し、これが燃料蒸気濃度の不均一分布を形成する。これらの渦の間では、噴霧中心部では後続の渦から濃混合気が流入するが、噴霧周囲部では高温の周囲空気の導入が盛んであり、これにより渦が下流に移動する間に渦内部の混合気は希薄化すると同時にその温度は上昇し、この濃度、温度の変化に応じて燃料の酸化反応が進行して行く。最初の着火はこれらの渦の中で最初に形成された噴霧先端渦の噴霧内への空気導入が盛んな上流側の領域で発生する。

Fig.8 Effect of Reynolds number on interval between rich mixture clusters, and on Strouhal number obtained from frequency of fluctuation of fuel vapor concentration along central axis of evaporating spray

4. まとめ

非定常燃料噴霧における燃料蒸気濃度の不均一分布の成因と燃料濃度分布の不均一性と噴霧の着火位置に関係について調べるために、噴霧内燃料蒸気濃度と着火領域の高速2次元可視化を行った結果以下の知見を得た。

- (1)シリコンオイル粒子散乱光法は噴霧内の局所熱発生領域を検出するのに有効である。
- (2)蒸発自由噴霧では濃混合気塊が周期的に発生し下流へと輸送される。この混合気塊の通過周波数のストローハル数はレイノルズ数によらず約0.5である。この値は軸対称2次元単相噴流における大規模渦発生ストローハル数にほぼ等しい。
- (3)非定常自由噴霧では噴霧の先端渦とその後続の渦の間において着火が発生する。ここでは噴霧の先端渦運動により噴霧内への空気導入が盛んである。

本研究では、実験を本学大学院生の二宮弘行氏と皆川友宏氏に協力していただいた。また、実験に用いた銅蒸気レーザとイメージコンバータは(株)ナックより借用した。ここに記して感謝の意を表する。イメージングシステムは東京工業大学工学部「エネルギー・環境実験システム」の設備品であり、画像解析には同学工学部知能化機械設備を用いた。

参考文献

- (1) Azetsu, A., et al., Proc. of COMODIA90, pp.199-204, 1990.
- (2) Gülder, O., et al., SAE paper, No.920577, 1992.
- (3) Edwards, C. F., et al. SAE paper, No.920108, 1992.
- (4) Baritaud, T. A., et al., SAE paper, No.940681, 1994.
- (5) 小酒,他 2 名,日機論,59-559,B(1993),pp.859-864.
- (6) 小堀,他 1 名,日機論,65-631,B(1999),pp.1152-1158.
- (7) 小林,他 2 名,日機論,48-425,B(1982),pp.168-173.
- (8) 神本,他 2 名,日機論,53-487,B(1987),pp.117-120.
- (9) Yule, A. J., J. of Fluid Mech., Vol.89, pp. 413-432, 1978.
- (10) Beavers, G. S., et al., J. Fluid Mech., Vol.44, pp.97-112, 1970.
- (11) Grinstein, F. F., et al., AIAA J., Vol.25, No.1, pp.92-98, 1987.

Fig. 10 Lagrangian sketch of ignition in head vortices in a transient spray

Fig. 9 2-D distributions of scattering intensity from silicone oil droplets (top), vapor velocity (middle), and relative velocity to spray tip (bottom) in a cross section of evaporating spray