高温高密度雰囲気におけるディーゼル噴霧の蒸発過程の解析*

木戸 善行^{*1}, 名田 譲^{*1}, 矢野 貴之^{*2}, Azwan Sapit^{*3}, 中桐 実聡^{*2}

Analysis of Diesel Spray Evaporation Process in High Density and High Temperature Atmosphere

Yoshiyuki KIDOGUCHI^{*1}, Yuzuru NADA,
Takayuki YANO, Azwan SAPIT and Misato NAKAGIRI

^{*1} Tokushima Univ. Institute of Technology and Science, 2-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8506 Japan

Diesel engines, in recent years, come to apply high pressure charging and high EGR to improve engine performance. In this situation, it is important to study on diesel spray behavior and mixture formation under those kinds of condition. This study investigates diesel spray development and micro-scale characteristics of droplets evaporation including atomization under high density and high temperature atmosphere. Experiment was carried out by shadowgraph photography method. Our system has a nano-spark light source to illuminate spray injected into spray chamber. The image analysis can reveal droplets size-distribution and droplets dynamic behavior at spray boundary. Results indicate that, at early stage of injection, high atmospheric density accompanied with high temperature greatly affects droplets atomization and evaporation at spray boundary. High density atmosphere produces small-size droplets. Evaporation of large-size droplets is improved with high density and high temperature atmosphere.

Key Words : Diesel Engine, Spray, Droplets, Evaporation, Atomization, High Density Atmosphere

1. まえがき

近年のディーゼルエンジンでは、さらなるエンジン性能の向上のために高過給、高 EGR が高圧噴射、多段噴射とともに適用されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。このような技術の導入により、ディーゼル噴霧に対する雰囲気条件は変化している。とくに、高過給化は雰囲気密度の増加をともない、噴霧に対しては周囲空気の抵抗が変化して微粒化や混合気形成に影響する。また、実機のような高温雰囲気では、雰囲気密度が噴霧液滴の蒸発にも影響すると考えられる。一方でディーゼル燃焼過程においては、燃料噴霧の発達と混合気形成が着火・燃焼と排気に大きな影響を及ぼすことは変わらない。このため、新たな雰囲気条件に対して従来のディーゼル噴霧に対する多くの知見⁽⁴⁾⁻⁽¹¹⁾が適用できる範囲を明確にしつつ、新たな雰囲気条件に対する燃料噴霧の発達、混合気形成過程を調べて、着火・燃焼を的確に制御することが必要である。

このような背景から、本研究では高過給条件における噴霧と混合気形成について検討している。高過給化にともなう雰囲気圧力の増加が噴霧に及ぼす影響については、これまでに噴霧到達距離や噴霧角⁽⁴⁾⁽⁵⁾、噴霧の粒度分布⁽⁶⁾⁽⁷⁾、噴霧流動⁽¹²⁾などについて研究がなされている。しかし、これらは室温条件が多く、噴霧液滴の数密度が高い噴霧において空間的に個々の液滴を解析することも難しい。今後、温度条件も含めた実機に近い雰囲気条件での蒸発噴霧の巨視的、微視的な調査が必要になってくる。

本報告では、高過給条件におけるディーゼル噴霧液滴の生成と蒸発過程に着目し、とくに、噴霧境界の混合気形成と着火が燃焼に大きな影響を及ぼすことから⁽¹¹⁾⁽¹³⁾、着火遅れ期間に相当する燃料噴射初期の噴霧境界域に対する雰囲気温度および雰囲気圧力の影響について実験的に調べた。実験では、定容噴霧室に急速圧縮装置を接続

* 原稿受付 2013 年 1 月 14 日

^{*1} 正員、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

^{*2} 学生員、徳島大学大学院先端技術科学教育部

^{*3} 徳島大学大学院先端技術科学教育部

E-mail: kidoguchi@tokushima-u.ac.jp

して、噴霧室内に任意の温度、密度雰囲気を形成して燃料噴射を行い、ナノスパーク光源とフィルムカメラを用いたシャドウグラフ撮影法により蒸発ディーゼル噴霧の撮影を行った。撮影画像から、噴霧境界域に生成する液滴の粒径分布、液滴の動的挙動、蒸気相の発達について解析した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1⁽¹¹⁾に示す。実験装置は、噴霧撮影光学系のほか、急速圧縮装置、噴霧室、および燃料噴射装置で構成されている。急速圧縮装置では、直径 50mm のアルミ製ピストンを高圧室素で駆動してシリンダ内のガスを急速圧縮することにより、定容噴霧室内にディーゼル燃焼場に近い任意の温度、圧力場を形成する。本研究ではシリンダ内に不活性ガスの N_2 と Ar を充填して圧縮し、非燃焼条件で噴霧観察を行った。噴霧室上部には燃料噴射弁を設置し、噴孔径 0.18mm の単噴孔ノズルにより JIS2 号軽油を噴射した。

噴霧撮影の光学系は、発光半値幅が約 30ns のナノスパーク光源⁽⁹⁾を用いたシャドウグラフ撮影光学系となっており、ナノスパーク光源からの光を噴霧室内に通過させるため、噴霧室の両側面にパイレックスガラス製観察窓を設置し、噴霧室に対して光源と反対側には 6×7 版スチルカメラを配置した。この光学系で焦点影撮影を行うことにより、ディーゼル噴霧中心軸を含む断面の拡大静止画像を得た。また、噴霧液滴の動的挙動を観察するために、図 2 に示す多重偏光光学系⁽¹⁴⁾も構築した。この光学系は、ハーフミラーと偏光フィルタによって 2 組の独立なシャドウグラフ撮影光学系を構成しており、同一視野を 2 枚のフィルム上に、他方からの影響なしにそれぞれ独立に結像できる。したがって、時間差をおいて 2 つの光源を発光させれば、それぞれの光学系から同一噴霧の異なる時刻の画像が得られる。この 2 枚の噴霧画像から噴霧境界域における液滴の時間的な挙動を解析した。

画像解析では、画像処理ソフト (HULINKS IGOR) により噴霧液滴の粒径を求めた⁽¹⁵⁾。また、撮影フィルム画像を CCD スキャナ (EPSON GT-X970) により解像度 3200dpi, 16bit (65536 階調) で取り込み、実解像度 2.2 μ m/pixel の解析画像を得た。この解析画像に対し、原画像中の最高輝度に対して 9% 以下の輝度領域を噴霧の高密度領域と定義して抽出した。高密度領域から外側の噴霧境界では、比較的低密度に液滴が存在し、高温条件では燃料蒸気相も観察される。噴霧境界の蒸気相は周囲との輝度差が小さく、輝度をしきい値にできないため、原画像から輝度勾配データを求め、平均輝度勾配をしきい値として二値化することにより蒸気相領域を求めた。

実験では、噴射圧力 P_i は 100MPa、燃料噴射期間は 2ms 一定とし、不活性ガスを充填した定容の噴霧室内で雰囲気密度および温度を変数とした。雰囲気密度 ρ は 15kg/m³ および 20kg/m³ とし、燃料噴射時の雰囲気温度 T_i は 298K, 500K および 700K とした。本研究では着火遅れ期間中に相当する蒸発噴霧の挙動を調べるため、燃料噴射開始後 $t=0.5$ ms におけるディーゼル噴霧の撮影を行った。

Fig.1 Experimental setup of single nano-spark shadowgraph photography method

Fig.2 Optical setting of dual nano-spark shadowgraph photography method

3. 実験結果

3・1 雰囲気温度および雰囲気密度が噴霧構造に及ぼす影響

図 3 は $T_i=298$ K の室温雰囲気中で雰囲気密度 ρ を 15kg/m³ (図 a) および 20kg/m³ (図 b) としたときの噴霧画像を比較したものである。撮影は噴射開始から $t=0.5$ ms の時刻で行った。噴霧の全体構造については、雰囲気密度が

大きくなると、噴霧到達距離は短くなるとともに、 $\rho=15\text{kg/m}^3$ に比べて $\rho=20\text{kg/m}^3$ では噴霧先端が高濃度になっている。また、噴霧と周囲空気との摩擦によって噴霧境界で形成されるリガメントはいずれの噴霧でも観察されるが、中段の画像で観察されるリガメントの規模は $\rho=20\text{kg/m}^3$ のほうが大きい。噴霧の中流域 (Region A) および下流域 (Region B) における噴霧境界域の拡大画像を比較すると、中流域では雰囲気密度が大きい $\rho=20\text{kg/m}^3$ のほうが小粒径の液滴が高密度に観察される。したがって、雰囲気密度が高くなると、中流域では噴霧の微粒化が比

Fig.3 Effect of ambient density on spray structure and droplets formation at room temperature ($T_i=298\text{K}$)

Fig.4 Effect of ambient density on spray structure and droplets formation at high ambient temperature ($T_i=500\text{K}$)

較的早期に進むと思われる。下流域では、 $\rho=15\text{kg/m}^3$ および 20kg/m^3 ともに液滴が高密度に生成し、さらに、噴霧境界域で観察される液滴サイズが小さくなっている。

図4は雰囲気温度を $T_i=500\text{K}$ としたときの比較である。 $T_i=500\text{K}$ になると液滴が蒸発して蒸気相も形成される。とくに、 $\rho=20\text{kg/m}^3$ における噴霧中流域で蒸気相の形成が顕著である。図3の $T_i=298\text{K}$ ではこの領域で小径の液滴が多く観察されたことから、雰囲気が高温で密度の大きい条件では、噴霧中流域の噴霧境界で小径液滴の蒸発により蒸気相の形成が進んだと考えられる。

図5は蒸発噴霧の画像を解析して、噴霧を高密度領域と蒸気相領域に区分して示したものである。図中Zは噴孔出口からの距離、Xは噴霧中心軸からの距離である。(a) $T_i=500\text{K}$ 、(b) $T_i=700\text{K}$ ともに、雰囲気密度の大きい $\rho=20\text{kg/m}^3$ では噴霧中流域の $X=30\text{mm}$ 付近を主として高密度領域が狭くなっている。これは、高温で密度の大きい雰囲気に燃料噴射を行ったことで、噴霧上流域から高温の空気が噴霧内に導入され燃料の蒸発が進んだためと考えられる。しかし、蒸気相領域外縁の広がりには $\rho=15\text{kg/m}^3$ とほとんど変わらない。これは高密度雰囲気のため、蒸気相が空間的に拡大しにくいと思われる。これより、高密度雰囲気では、燃料噴射初期に噴霧中流域で形成される蒸気相領域の燃料蒸気密度が急速に増大することにより着火が早まると考えられる。また、雰囲気温度が高い $T_i=700\text{K}$ では $T_i=500\text{K}$ に比べて噴霧先端部でも蒸発領域が大きく拡大する。

Fig.5 Division into high density and vapor-phase regions for evaporating spray

3・2 雰囲気温度および雰囲気密度が噴霧液滴の生成および挙動に及ぼす影響

3・2・1 噴霧境界における液滴の生成と蒸発

前節で雰囲気密度が液滴の生成・蒸発に影響を及ぼすことが示された。ここでは、液滴径の空間分布を調べた。

図6は図3、4の画像を解析して $X=17\sim 36\text{mm}$ 付近の噴霧中流域(Middle)および $X>36\text{mm}$ の噴霧下流域(Downstream)の噴霧境界に生成した各液滴の粒径を求め、 $5\mu\text{m}$ 毎の代表径Dで液滴数Nを表したものである。

図6(a)の $T_i=298\text{K}$ をみると、上図の中流域(Middle)において $\rho=15\text{kg/m}^3$ では直径 $25\mu\text{m}$ 程度の液滴割合が多いが、高密度雰囲気の $\rho=20\text{kg/m}^3$ では $\rho=15\text{kg/m}^3$ に比べて $D<20\mu\text{m}$ の小径液滴の数が増える。これは先に述べたように、高密度雰囲気への燃料噴射によって噴霧の微粒化が促進されたためと考えられる。下図の下流域(Downstream)では液滴が高密度に生成するため、解析できる液滴数は少なくなってしまうが、液滴分布からは、下流域においては $\rho=15\text{kg/m}^3$ でも $D<20\mu\text{m}$ の小径液滴の割合が増加することがわかる。

一方、図6(b)の $T_i=500\text{K}$ では、液滴の蒸発が進むためいずれの雰囲気密度でも観察される液滴数は $T_i=298\text{K}$ に比べて減少する。しかし、 $T_i=298\text{K}$ の場合と同様に、 $\rho=15\text{kg/m}^3$ では中流域で $D=25\mu\text{m}$ 程度の粒径割合が多い液滴分布となる。これより、大径の液滴は蒸発が進まないことがわかる。 $\rho=20\text{kg/m}^3$ では $T_i=298\text{K}$ の場合と比較して中流域で $D=25\mu\text{m}$ 付近の液滴数が大きく減少し、下流域では $D>25\mu\text{m}$ の大径液滴の減少が顕著になる。このことから、高密度雰囲気では大径の液滴でも蒸発が促進されるといえる。

Fig.6 Comparison of droplets size-distribution

3・2・2 液滴の挙動

つぎに、雰囲気密度が液滴の挙動に及ぼす影響を調べた。図7は、 $T_i=298\text{K}$ の条件で多重偏光光学系を用いた撮影によって得た2枚の噴霧画像を解析して、噴射開始後 $t=0.5\text{ms}$ における液滴の速度ベクトルを求めたものである。雰囲気密度にかかわらず、噴霧中流域の $Z=30\text{mm}$ 付近で噴霧上流方向に移動する液滴があらわれ、 $Z=20\text{mm}$ 付近の噴霧上流域では液滴が噴霧に取り込まれる方向に移動している。 $Z>40\text{mm}$ になると、液滴の速度は大きくなり、噴霧から遠ざかる方向に移動する。これらは従来の噴霧観察結果⁽¹⁰⁾と同様であり、噴霧周囲の空気流動の影響を受けている。雰囲気密度による違いは、 $Z=30\text{mm}$ 付近の液滴速度、および $Z=40\text{mm}$ 付近における液滴の移動方向にあらわれているように思われる。

図8は、雰囲気密度が液滴の挙動に及ぼす影響を明らかにするために図7の個々の液滴の速度ベクトルから液滴の移動方向と速度の関係をまとめたものである。横軸の θ は、速度 v で移動する液滴の移動方向を角度で示しており、図中に示すように噴霧軸に対して垂直方向を $\theta=0^\circ$ として、これより噴霧上流方向に移動する場合を正、下流方向に移動する場合を負の角度とした。

図上段の中流域における液滴の速度分布から雰囲気密度による違いをみると、上段左図の $\rho=15\text{kg/m}^3$ では液滴の移動方向が下流方向 ($\theta<0$) から噴霧主流と反対の上流方向 ($\theta>0$) になると液滴速度が $v>4\text{m/s}$ から $v=2\text{m/s}$ 程度に低下する。これに対して上段右図の $\rho=20\text{kg/m}^3$ では、液滴の移動方向が変化しても速度はおおよそ $v=4\text{m/s}$ でほとんど変化しない。これは、高密度雰囲気への燃料噴射により噴霧境界で強い渦が形成され、さらに図6(a)で

Fig.7 Comparison of droplets dynamic behavior ($T_i=298\text{K}$) Fig.8 Relation between droplets velocity and flying direction ($T_i=298\text{K}$)

みたように小径の液滴が多く生成されたことから、小径の液滴が渦に乗って速度を減ずることなく移動しているためと思われる。

図下段の下流域における速度分布をみると、下段左図の $\rho=15\text{kg/m}^3$ では、 $\theta<-60^\circ$ で噴霧下流に向かう方向の液滴と $\theta>0$ となって噴霧上流に向かう方向の液滴に概ね二分される。これは、雰囲気密度が低い場合は、噴霧境界で生成した液滴は、噴霧先端部では噴霧から遠ざかる方向に移動し、 $Z=40\text{mm}$ 付近の下流域では速度の大きい主流に対して液滴が噴霧上流方向に移動することを示している。これに対して下段右図の $\rho=20\text{kg/m}^3$ では、多くの液滴が $\theta\approx 0^\circ$ となって噴霧軸に対してほぼ垂直方向に移動する。雰囲気密度が高まると、噴霧の進展が抑えられるとともに噴霧境界で生成する液滴の移動も抑制されるため、噴霧下流域から先端部にかけて生成する液滴は噴霧軸に対して垂直方向に移動すると考えられる。

4. まとめ

高温高密度雰囲気でのディーゼル噴霧の燃料噴射直後の噴霧境界域における液滴の生成と蒸発相の形成、液滴の動的挙動について、シャドウグラフ撮影法により調べた。主な結果は以下の通りである。

- (1) 雰囲気密度が高くなると、噴霧中流域の噴霧境界で局所的に形成されるリガメントが大きくなり、直径 $20\mu\text{m}$ 以下の小径液滴の割合が高くなって噴霧の微粒化が早期に進む。
- (2) 高温雰囲気において、雰囲気密度の増大は大径の液滴の蒸発を促進する効果があり、高密度雰囲気による微粒化効果は、高温でより顕著になる。
- (3) 燃料噴射初期において、高密度雰囲気では、噴霧の蒸発が進んで噴霧中心軸付近の高密度領域は小さくなる一方、燃料噴射初期には蒸気相が空間的に噴霧外側に拡大しにくい。
- (4) 雰囲気密度が高まると、噴霧の進展が抑えられ、それとともに、噴霧下流域の噴霧境界で生成する液滴は噴霧軸に垂直方向に噴霧から遠ざかる方向に移動しやすい。
- (5) 噴霧中流域で生成する液滴は、噴霧主流と逆方向の噴霧上流方向に速度を低下させながら移動する。このとき、高密度雰囲気では、液滴の速度が低下しにくい。

文 献

- (1) 足立隆幸, 小林雅行, 村山哲也, 青柳友三, 鈴木央一, 後藤雄一, “高過給・広域多量 EGR の多気筒ディーゼルエンジンにおけるハイプレッシャーおよびロープレッシャー EGR の効果”, 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 4 (2009), pp.1047-1052.
- (2) 足立隆幸, 小林雅行, 橋本宗昌, 村山哲也, 青柳友三, “燃料噴射系の改良および幾何圧縮比アップによる高過給・広域多量 EGR ディーゼルエンジンの熱効率向上”, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 5 (2011), pp.1099-1104.
- (3) 堀田義博, 稲吉三七二, 中北清巳, 秋濱一弘, 稲垣和久, 阪田一郎, “高過給・高 EGR と高圧噴射による HSDI ディーゼル機関の大幅排気低減”, 自動車技術会論文集, Vol. 37, No. 6 (2006), pp. 139-145.
- (4) Hiroyasu, H., Kadota, T. and Arai, M., “Fuel Spray Characterization in Diesel Engines”, *SAE Paper* No.740715 (1974).
- (5) 神本武征, 松岡信, 志賀聰氏, “ディーゼル機関の燃料噴霧の噴射初期における到達距離”, 日本機械学会論文集, Vol.41, No.342 (1975), pp.672-683.
- (6) 竹内貴一郎, 千田二郎, 山田耕司, “定用容器内のディーゼル噴霧の粒度分布について”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.50, No.450 (1984), pp.494-502.
- (7) 新井雅隆, 岸次男, 廣安博之, “レーザ回折を応用した粒径解析装置の特性と噴霧の粒度分布計測”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.50, No.449 (1984), pp.98-106.
- (8) 座間康夫, 真中佑太, 新井雅隆, “ディーゼル噴霧構造に与える雰囲気圧力の影響”, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 2 (2012), pp.407-412.
- (9) 石山拓二, 三輪恵, 鴨川正博, 劉育民, 宮城勢治, “ナノスパーク光源によるディーゼル噴霧の微細構造の観察”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.60, No.570 (1994), pp.715-721.
- (10) Mohammadi Ali, 阿部誠, 三輪恵, “ディーゼル噴霧の液滴群の挙動と周囲気体の導入過程に関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.64, No.625 (1998), pp.3106-3112.

- (11) Abdullah, A., Inukai, N., Kidoguchi, Y. and Miwa, K., “A study on Droplets Evaporation at Diesel Spray Boundary during Ignition Delay Period”, *SAE Paper* No.2007-01-1893 (2007).
 - (12) 落合渉, 座間淑夫, 新井雅隆, “ディーゼル噴霧における雰囲気圧力と燃料噴射圧力が混合気形成に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, Vol. 43, No. 6 (2012), pp. 1239-1244.
 - (13) 八房智顯, 木戸口善行, 宮本貴之, Amir Khalid, 川上淳, 大前和広, “雰囲気密度および温度がディーゼル噴霧の発達と燃焼に及ぼす影響”, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.5 (2009), pp.1235-1241.
 - (14) Abdullah, A., Yatsufusa, T., Gomi, T., Irie, N. and Kidoguchi, Y., “Analysis of Droplets Evaporation Process of Diesel Spray at Ignition Delay Period using Dual Nano-spark Shadowgraph Photography Method”, *SAE Paper* No.2009-32-0017 (2009).
 - (15) 八房智顯, 木戸口善行, Abdullah, Adam, 五味智紀, “長距離顕微シャドウグラフ撮影によるディーゼル噴霧の液滴径計測”, 微粒化, Vol.18, No.63 (2009), pp.88-95.
-