画像相関法によるディーゼル燃料噴霧内部の流動特性の解析*

高岸 佐代^{*1}, 高橋 知宏^{*2}, 段 智久^{*3}
千田 二郎^{*4}, 藤本 元^{*4}

Analysis of Flow Field in Diesel Fuel Sprays by Particle-Image Velocimetry

Sayo TAKAGISHI, Tomohiro TAKAHASHI, Tomohisa DAN,
Jiro SENDA and Hajime FUJIMOTO

The characteristics of combustion process in internal combustion engines are affected by mixing process between the injected fuel and the ambient gas. Therefore, it is necessary to understand the flow field in diesel fuel sprays. In this study, a single spray was injected into a quiescent atmosphere with room temperature at high pressure through a single hole nozzle for simplification. To discuss the flow field in diesel sprays, structure of the spray was visualized by laser light sheet method. And, it was revealed that the vortex structure inside the spray affects the classification of droplet particles by taking microscopic photographs of the droplets with high resolution film. And applying PIV method into the spray photography, both the formation of meandering structure of the spray mainstream and the ambient gas entrainment process are clarified.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Spray Structure, Turbulent Mixing, Vortex, Laser Sheet Method, PIV

1. 緒言

ディーゼル噴霧のような液体燃料が過渡的に噴射される現象は様々な物理因子によって影響される複雑な現象である。従来より、噴霧構造として噴霧角、到達距離等の巨視的な噴霧特性について種々の物理量因子等の影響に関する実験式が提案されている^{(1),(2)}。しかし、これらは燃焼室内の噴霧構造の巨視的な把握には十分であるが、噴霧火炎内における有害燃焼生成物の生成機構を解明するには噴霧内部の不均一構造⁽³⁾を含めた時間的、空間的挙動が重要となる。そのため、噴霧内部構造の可視化⁽⁴⁾、および時間変化⁽³⁾等、噴霧構造やその形成機構に関する研究が数多くなされている。

筆者らは、噴霧の微粒化機構の解明を目的とし、ノズル内流動⁽⁵⁾、噴射圧力⁽⁶⁾、雰囲気気体の粘性⁽⁷⁾が噴霧構造に与える影響について調べ、噴霧内部の不均一構造は、液滴粒子と渦構造の相関により成り立つという知見を得た。

本研究では、噴霧内部構造と雰囲気気体との混合過程を解明することを目的とし、エントレインメントを高精度測定により定量化することを試みた。本報では、定容容器内の常温高圧静止場に単孔ホールノズルから噴射される非定常自由噴霧を対象とし、その噴霧構造をレーザシート散乱光の撮影により解析した。高線解像度フィルムを用いて撮影した噴霧を局所拡大撮影し、噴霧内部構造の把握を行なった。また、噴霧内の流動場における液体燃料噴霧および雰囲気気体の流動を画像相関法(PIV)を用いて解析した。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 既報⁽⁵⁾で使用した定容容器($\phi 295 \times 200\text{mm}$)の静止雰囲気中に、電子油圧式単発高圧噴射装置⁽⁸⁾によって燃料を鉛直下方に噴射する。装置は噴射弁本体、燃料供給系、油圧制御系の3つの部分から構成されている。噴射弁本体の上部には増圧機構が一体化されて組み込まれており、任意の噴射圧力 p_{inj} が得られる。

2・2 撮影光学系装置 図1にレーザシート散乱光撮影光学系装置の概略を示す。光源には Nd:YAG レ

* 1997年9月3日 第14回内燃機関シンポジウム(名古屋)において講演、原稿受付 1998年5月21日。

*1 (株)スバル研究所(☎181-8577 三鷹市大沢3-9-6)。

*2 学生員、同志社大学大学院(☎610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。

*3 正員、日本学術振興会(☎610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学)。

*4 正員、同志社大学。

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

ーザ (Spectra-Physics 製; Quanta-Ray DCR-11, 発光波長 532nm, 発光半値幅 8ns/pulse) を用いた. 発振されたレーザ光は $\phi 5\text{mm}$ のピンホールを通過し, 焦点距離の異なる 2 枚のシリンドリカルレンズ (焦点距離 $f=15\text{mm}$, $f=1000\text{mm}$) によってシート状 (噴霧中心軸上で厚さ約 0.2mm, 高さ約 100mm) にされ, 噴霧中心軸を含む噴霧縦断面に入射される. 入射面上での液滴群による散乱光画像を, 入射方向に対し直交方向に配置された 35mm スチールカメラ (ニコン F301, フィルム フジマイクロフィルムネガティブ HR2 線解像力: 850 本/mm) により膜面撮影倍率 0.27 倍で瞬間撮影した. 上記の高線解像度フィルムに撮影した噴霧全景の画像を, 図 2 に示す撮影系により接写して噴霧中の各領域の微細な液滴群の観察を行なった. ここでは噴霧全景のネガフィルムを実体顕微鏡を介して撮影倍率 5~10 倍程度で 35mm スチールカメラ (ニコン M-35, フィルム ネオパン 400 線解像力: 60~80 本/mm) により撮影した. なお, 光源には蛍光灯を用いた. また, 画像相関法による解析のため, 高速度ビデオカメラ (KODAK EKTAPRO 4540) により噴霧断面の散乱光画像を撮影速度 4500fps で連続撮影した. この際, 光源には連続発振の Ar イオンレーザ (Spectra-Physics 製; MODEL 165, 発振波長 488nm) を用いた.

2・3 実験条件 供試燃料には, n-トリデカン ($\text{C}_{13}\text{H}_{28}$, $\rho_f=756.2\text{kg/m}^3$, $\nu_f=2.48 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) を用いた. 燃料噴射ノズルには単孔ホールノズル (噴口径 $d_n=0.20\text{mm}$, ノズルパラメータ $l_n/d_n=5.0$) を用い, 噴射圧力は $p_{inj}=77\text{MPa}$, 噴射量は $Q_{inj}=12\text{mg}$ である. また, 雰囲気気体には室温 (293~295K) の窒素を用い, 密度条件 $\rho_g=18\text{kg/m}^3$ の条件で実験を行なった.

3. 拡大撮影による噴霧内部構造の可視化

3・1 レンズ系絞りによる撮影画像の変化 噴霧全体像の撮影に使用した高線解像度フィルムは線解像度 850 本/mm を有し, 従来のフィルムの線解像度 60~80 本/mm に対して約 10 倍以上の解像力を持つ. このため, 従来のフィルムでは線解像度の不足から微小な液滴粒子が観測されず, いくつかの粒子を 1 つの塊として捉えていたが, 高線解像度フィルムを用いることにより, 微小液滴粒径を捕らえることが可能となる.

高線解像度フィルムを用い, レンズ系絞りの違いによる撮影画像の差異について調べるため, 絞り値を 4, 5.6, 8, 11 と変化させて噴霧の撮影を行なった. その結果を図 3 に示す. 撮影倍率はフィルム膜面上で 0.27 倍である. 図 3 (a) では絞り値が小さく光量が多いため, 噴霧内部においてハレーションを起こしている領域が

Fig.1 Schematic diagram of optical system for laser light sheet scattering

Fig.2 Magnified photograph of the high-resolution film

大きくなり, 噴霧中心軸近傍における噴霧構造の把握が困難となる. その一方で, 噴霧外縁部に分布する小さな渦の観測が可能となる. これに対し, 図 3 (b), (c), (d) では, 絞り値が大きくなるにつれて光量が減少するため, ハレーションを起こしている領域が小さくなり, 噴霧半値幅程度の渦が確認でき, 噴霧内部構造の可視化が可能となる. しかし, この場合は噴霧外縁部や先端部の燃料密度が低い部分の散乱光を捉えることができなくなるため, 先端ではあたかも燃料塊がちぎれて先行するように捕らえられる.

さらに, 図 4 に絞り値を 4, 11 とした場合の噴霧外縁部の実体顕微鏡による拡大撮影結果 (噴霧軸方向距離 $Z=55\text{mm}$, 噴霧半径方向距離 $R=9\text{mm}$) を示す. 図 4 において, (a) の画像は (b) の画像よりも燃料液滴径が過大に評価されているが, これは絞り値が減少するこ

とにより光量が増加し、液滴粒子の微弱な散乱光を検知しやすくなるためである。

以上のことから、絞り値の決定は噴霧内部構造について必要とする情報に応じて行なわなければならない。また、カメラレンズの絞り値の変化に伴い認識される液滴径が変化することから、粒径評価においては、雰囲気条件や噴射圧力などをパラメータとして、同一絞り条件において比較を行なう必要がある。なお、絶対値の測定には検定を必要とする。本報では、液滴径の相対的な大きさの変化のみについて論ずる。

3・2 噴霧内部における渦構造 噴霧内部における渦構造は、噴霧の混合・拡散などに重要な役割を果たし、噴霧構造を論ずる上では無視できない。そこで、噴霧軸方向 $Z=75\text{mm}$ において噴霧外縁部から中心軸に向かって渦構造の拡大撮影を行なった。その結果を図5に示す。外縁部では比較的大きな径を持つ粒子群が観測されるが、外縁から中心方向に行くにつれ、一度小さな径を持つ粒子群が現れ、再び大きな径を持つ粒子群が存在する。

燃料液滴の分散機構において、小さな粒子はその運動量が小さいことも相まって、導入した雰囲気気体の渦構造の流動に追従し、大きな粒子はその流動に追従することなく噴霧下流域にまで達するとされるが、大規模渦に追従する中間的な大きさの粒子は遠心力により噴霧外縁部に分布していることが、図5の結果より示唆される。このことは、粒子の大きさと様々な大きさの渦（乱流特性）を有する噴霧内の渦との相関において、渦構造による粒子の Stokes 数に起因する分級を裏付けるものである。また、この渦構造による分級作用は、噴霧内の燃料液滴粒子の拡散を促す要因であり、

噴霧内部の液滴群の分布、すなわち燃料濃度はこの液滴と渦の分級過程の相互作用により決定される。

(a) Aperture 4

(b) Aperture 11

Fig.4 Magnified spray photographs with changing camera aperture

Fig.3 Inner structure of diesel spray with camera aperture

なお、中間的な大きさの粒子が層状に遠心力によって分布すると考えた場合、その渦構造が遠心力を発生する機構、すなわち角運動量を有する剛体的な回転運動を伴うことになる。そこで、噴霧の運動について次節で解析を行なう。

4. 画像相関法による噴霧内流動の解析

4・1 画像相関法⁽⁹⁾ 本研究では、流体自身の濃度によって変化する輝度むらをトレーサとして、画像相関法を用いて解析を行なった。これは、微小時間差を持つ二画像の輝度むらから任意の相関処理領域（以下ウィンドウと称する）内の相互相関係数を求め、これが極大となる位置からその微小時間内における対象現象の移動量を知るものである。これにより、噴霧内における流動および乱れを求めることができる。図 6 にそのフローチャートを示す。

4・2 解析原理⁽⁹⁾ 本解析では、レーザシート法の散乱光によりノズル軸を含む二次元断面における噴流内のランダムな輝度むらの時間的変化を高速 VTR を用いて直接撮影する。それにより、撮影画像（幅 512 line 高さ 480 line）の輝度の真っ黒な部分を 0、明るい部分を 256 として数値化し、その輝度むらをトレーサとして噴霧内部の流動を捕らえる方法を用いた。

時間 t における二次元ベース画像の位置 (R, Z) での画像濃度を $I_{(R,Z)}$ 、その微小時間後 $t+\Delta t$ の二次元ベース画像の位置 (R, Z) での画像濃度を $I'_{(R,Z)}$ とすれば、座

標 (R, Z) を中心とする時間 t のウィンドウとその微小時間後 $t+\Delta t$ のウィンドウとの相互相関係数 $S_{(\zeta, \eta, \theta)}$ は式 (1) のように表される。

$$S_{(\zeta, \eta, \theta)} = \frac{\langle \{I_{(R,Z)} - \bar{I}\} \{I'_{(R+\zeta, Z+\eta)} - \bar{I}'\} \rangle}{\langle \{I_{(R,Z)} - \bar{I}\}^2 \rangle^{1/2} \langle \{I'_{(R+\zeta, Z+\eta)} - \bar{I}'\}^2 \rangle^{1/2}} \quad (1)$$

ただし、 ζ, η はそれぞれ微小時間内における、 R, Z 方向の移動量、 θ はウィンドウの回転角、 $\bar{I}, \bar{I}'$ はそれぞれの時間における座標 (R, Z) 、 $(R+\zeta, Z+\eta)$ を中心とするウィンドウ内の空間濃度平均、記号 $\langle \rangle$ はウィンドウの総和を表す。

Fig.6 Calculating flow chart of cross-correlation

Fig.5 Visualized vortex by droplet size distribution

また、画像相関法ではその処理において適切なスイープ領域、ウィンドウサイズの決定を行なう必要がある。スイープ領域の決定は、二次元ベース画像における対象物の最大移動速度が問題となる。ここでは、その速度とベース画像の分解能から、単位時間当たりの移動量を対象画像の最小単位、すなわちピクセルで表し、対象となる二画像間の時間差を乗じて対象物の最大移動量をピクセルで求め、スイープ領域とした。ウィンドウサイズの決定は、ウィンドウサイズが小さすぎると相互相関係数が振動し、スイープ領域内に多数のピークが存在し、相関の対応付けの判断を誤る可能性がある。一方、ウィンドウサイズが大きすぎると、流速ベクトルはウィンドウ内の速度ベクトルを平均化したものであるため、算定される局所の速度の精度が低下する。そこで本解析では、図7に示すように、十

Fig.7 Calculation results of velocity by PIV with changing size of image window

分小さいと考えられるウィンドウサイズを順次大きくしていき、流動状態を示す速度ベクトルの分布がほぼ変化しなくなる大きさのウィンドウサイズ、ここではウィンドウサイズ=20をその画像における適切なウィンドウサイズとして適用した。

4・3 解析結果 噴霧画像の輝度むらをもとに噴霧内部の流動を求めるが、燃料濃度の高い領域はハレーションを生じているため、正確な輝度が得られない。また、高速度カメラの撮影速度、画像解像力に対して燃料液滴速度が大きすぎるため、燃料濃度、液滴速度の低い噴射終了後 ($t=15\text{ms}$) の噴霧画像を対象に解析を行なった。

図8に噴射圧力 77Mpa、噴射開始後 15ms における軸方向距離 $Z=27\sim 64\text{mm}$ の領域の解析結果を示す。撮影速度は 4500 コマ/s であり、時間間隔は 5 コマ、す

Fig.8 Calculated results of velocity and luminance by PIV

なわち 1.1ms である。(a)は画像処理を行なった噴霧の画像を、(b)は噴霧画像内部の速度分布を、(c)は噴霧画像内の各ウィンドウにおける平均輝度分布を示す。

図 8 において、噴射終了からかなり時間が経過しているため、大きな運動量をもつ大粒径の液滴群はこの領域には存在せず、噴霧全体に渡り比較的小粒径の液滴群で噴霧が構成されている。そのため、ほとんどの粒子が雰囲気の流れに追従しており、液滴群の速度ベクトルは同一方向に並び、一筋の流れとして流動状態が示される。図 8 (b)において、噴霧主流部で $(R,Z) = (-2,38)$ を中心とした時計廻りの渦構造が確認される。この渦構造は、より上流の $(R,Z) = (0,36)$ 付近の噴霧下流方向の一樣流により、その形成を促されたものであると考えられ、この噴霧軸近傍を境とした流れの相互干渉が千鳥状の渦を形成する一因であると考えられる。また、 $(R,Z) = (-2,38)$ の渦について図 8 (c)に注目すると、渦の中心ほど輝度が下がっており、輝度分布を液滴径分布と考えると渦による燃料液滴の分級が確認できる。また、噴霧外縁部において、噴射終了からかなりの時間が経過しているが、僅かながらも雰囲気気体を取り込みつつ噴霧の成長が行なわれていることが分かる。この解析により得られた噴射終了後の噴霧内の流動状態、渦構造および液滴の分布についてモデル化したものを図 9 に示す。

Fig.9 Spray structure model after injection period

5. 結言

本研究では非定常ディーゼル自由噴霧を対象に、その噴霧構造を巨視的、微視的に解析し、以下の結論を得た。

- (1) 噴霧内に存在する渦構造は、粒子の大きさとの相関により粒子の分級を促すとともに、拡散に寄与する。
- (2) 噴射終了後の噴霧内部の流動解析から、噴霧主流域の蛇行現象の形成機構、噴霧が成長する過程で雰囲気気体を取り込む様子が明らかとなった。

終わりに臨み、噴射系作製に関し、多大なるご厚意を頂いた東京工業大学 神本武征教授および(株)ゼクセルに、また、実験に協力を得た金子武史氏、瀬戸口裕崇氏(いづれも当時同志社大学工学部生)に深甚の謝意を表す。

参考文献

- (1) 例えば、横田克彦、松岡信、ディーゼル機関燃料噴霧の実験的研究、日本機械学会論文集(2), Vol.43, No.373, 1977-9, pp.3455-3464.
- (2) 例えば、広安博之、新井雅隆、ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角、自動車技術会論文集, No.21, 1980, pp.5-11.
- (3) A.Azetu, S.Dodo, T.Someya & C.Oikawa, A Study on the Structure of Diesel Spray (2-D Visualization of the non-Evaporating Spray), Int. Symp. COMODIA90 (Kyoto), 1990, pp.199-204.
- (4) O.L.Gülder, G.J.Smallwood & D.R.Snellings, Diesel Spray Structure Investigation by Laser Diffraction and Sheet Illumination, SAE Paper, No.920577, 1992.
- (5) 段智久、大石直己、千田二郎、藤本元、ディーゼル噴霧の微粒化機構に関する一考察、日本機械学会論文集(B), Vol.60, No.577, 1994-9, pp.3192-3197.
- (6) 段智久、高岸佐代、大石直己、千田二郎、藤本元、高圧燃料噴射時のディーゼル噴霧の構造に関する研究、日本機械学会論文集(B), Vol.62, No.597, 1996-5, pp.2079-2085.
- (7) 段智久、高岸佐代、大石直己、千田二郎、藤本元、ディーゼル噴霧の構造に与える雰囲気粘性の影響、日本機械学会論文集(B), Vol.62, No.599, 1996-7, pp.2867-2873.
- (8) 神本武征、小林治樹、石川研一、基礎研究のための電子油圧式ディーゼル噴射システムの試作、日本機械学会論文集(B), Vol.53, No.487, 1987-3, pp.1117-1121.
- (9) 平川勝歳、浅井崇胤、野上光秀、玄起守、千田二郎、藤本元、非定常ガス噴流における画像相関法を用いた乱流混合特性の解明、第 13 回内燃機関シンポジウム・講演論文集, 1996-7, pp.595-600.