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*

Ali MOHAMMADI^{*1}, 阿部 誠^{*2}, 三輪 恵^{*3}A Study of Droplet Behavior and Ambient Gas Entrainment Process
in a Diesel Spray

Ali MOHAMMADI, Makoto ABE and Kei MIWA

A particle tracking velocimetry method utilizing an intensified CCD camera and a laser light sheet was applied to quantify the surrounding gas entrainment into an intermittent non-evaporating diesel spray. The ambient gas was seeded by light particles and the two dimensional velocity of the surrounding gas was measured at several positions and times during the spray injection. A double-spark-back light photography method employing two nano-spark light sources was used to measure the temporal and spatial distributions of the instantaneous two-dimensional droplet velocity and the size-velocity correlation of droplets were obtained. Results of the ambient gas and droplets velocity were used to describe the droplets and surrounding gas interaction. The maximum velocity of the ambient gas was about 1/10 of droplets velocity which was much lower than the spray tip velocity. Entrainment of droplets into the spray started at $t=200\ \mu\text{s}$ from the injection start and at the middle of injection period most of droplets were following the ambient gas flow and entraining into the spray.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Atomization, Spray, Entrainment

1. ま え が き

直接噴射式ディーゼル機関では、燃料の微粒化や空気との混合過程が、着火や燃焼を支配して、機関性能ばかりでなく NO_x 、未燃炭化水素や微粒子などの有害排気物質の発生に大きく影響する。そのため、噴霧特性についての基礎研究が多くなされ、局所的な液滴の粒度分布や噴霧構造が詳細に解析され^{(1)~(4)}、液滴速度や噴霧周囲の気体の流動、ならびに噴霧内への空気導入についても報告が行われている^{(5)~(7)}。著者らは、これまで初期噴霧の微粒化過程について、ナノ秒スパーク光源を用いて、液滴の瞬間画像を撮影し、燃料液滴の個々の粒径と形状についての定量的な解析を行い⁽⁸⁾、また、ナノ秒ダブルスパーク法により噴霧近傍の個々の液滴速度を求め、噴霧近傍に形成される液滴は、噴霧の先端速度の約 1/5 の速度で飛行していることなどを明らかにした⁽⁹⁾。しかし、噴射初期の混合気形成過程を支配する燃料液滴と空気との微視的な挙動については、まだ十分解明されていないのが現状であ

る。

そこで本研究では、燃料と周囲気体との局所的な混合過程を明らかにするため、2 台のナノ秒ダブルスパーク光源を用いて、液滴の二重露光画像を撮影し、液滴の瞬間速度分布を求めるとともに、噴霧周囲の気体速度をレーザシート法により計測し、これらの結果から液滴と周囲気体の二次元速度分布を求め、液滴と周囲ガスとの混合の様子を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2・1 液滴速度と液滴寸法の計測 図1は、本研

Fig. 1 Schematic diagram of double-spark photography

* 原稿受付 1997 年 9 月 3 日。

^{*1} 学生員、徳島大学大学院(☎ 770-8506 徳島市南常三島町 2-1)。

^{*2} (株)ゼクセル(☎ 355-0027 東松山市美土里町 6-18)。

^{*3} 正員、徳島大学大学院工学研究科。

究で用いた単発燃料噴射系とダブルスパーク発光撮影光学系を示す。燃料噴射には、モータ駆動によるボッシュ形噴射ポンプ(ZEXEL PE-A 形)を用いて、 $d_n=0.35$ mm 単噴口ノズル(ZEXEL DLLA-P)により開弁圧 $P_0=20$ MPa に設定して窒素を充てんした高压噴霧室(内径 90 mm, 高さ 200 mm, 雰囲気圧力 $P_a=1.0$ MPa)に軽油 1 号(密度 836 kg/m³)を噴射した。図 2 にこの実験で用いた噴射率を示す。噴霧の撮影には、既報⁽⁸⁾と同じ発光半値幅 30 ns のナノ秒スパーク光源を 2 台用いて、これを同じ光軸上に並べて、噴霧を背後から照明した。発光開始信号は、噴射ポンプの燃料ラック駆動用ソレノイドの励起信号と同期して、噴射の所定の時刻に 1 番めのスパーク光源へ送り、さらに遅延時間を与えて、2 番めのスパーク光源を発光させた。これにより、同一フィルム上に液滴群の二重露光拡大写真が撮影できる。撮影には、6×7 版スチルカメラと白黒フィルム(Fuji Neopan ASA 400)を使用して、図 3 に示す噴霧上流部と下流部の二つの円形視野(直径 ϕ 20 mm)で、フィルム膜面倍率 3.5 倍で撮影した。撮影画像は、画像処理装置(浅沼商会, ASA 2000)にて、焦点内液滴画像のみを抽出して、一対の液滴の重心距離を測定し、これをスパーク発光遅延時間で除して液滴速度を求めた⁽⁹⁾。

Fig. 2 Time history of injection rate

Fig. 3 Photography views

2・2 周囲気体速度の計測 次に、2・1 節と同じ噴射条件のもとで、噴霧の周囲気体の二次元速度分布を調べた。光源には、Ar イオンレーザ(SP 2017, 出力 4 W)を用い、連続光を音響光学変調器 AOM (KANOMAX 製, 18 F 5)によりパルス光列に変換した後、レンズ系により幅 50 mm, 厚さ 0.6 mm のレーザシート光として、噴霧室側方から噴霧軸を含む噴霧断面を照射した。撮影には、噴霧室にトレーサとしてマイクロバルーン(平均粒径 50 μ m, 密度 36 kg/m³)を浮遊させて、イメージインテンシファイア付き CCD カメラ IICCD (PCO 製, DiCAM 2)にて、周囲気体の流れを撮影した。撮影に先立って、浮遊粒子の動きを IICCD カメラでモニタして、浮遊粒子が静止していることを確認してから、燃料を噴射した。図 4 は、噴射、レーザパルス発光および IICCD カメラの制御信号を示す。まず、噴射ポンプの燃料ラックのソレノイドに噴射指示信号を送って、遅れ時間 t_i 後に噴射を開始した。また、同時に IICCD カメラに信号を送り、所定の遅れ時間 t_g を与えた後、ゲートを一定の期間 t_w の間開き、この期間内に AOM のトリガ信号を制御して、既定のパルス数とパルス幅だけレーザシート光として発光させ、トレーサ粒子を照射した。このとき、流れの方向を知るために、発光パルス幅を変えて、粒子の画像濃度に差を与えた。また、周囲気体速度は、噴霧主流部の速度に比べて非常に遅く、噴霧周囲の各領域によって速度が大きく異なるので、レーザパルスの発光間隔 Δt を各領域に応じて変更した。この粒子の移動距離と方向から周囲気体の速度ベクトルを液滴速度と同様に求めることができる。また、遅れ時間 t_g を変更することにより噴射開始から任意時刻の気体の流れが撮影できる。測定は、図 3 に示した五つの区画 (15 mm×10 mm) に分けて行った。

3. 実験結果

3・1 液滴の粒径と速度 まずはじめに、噴射開始からの時間 t を変更したときのノズル近傍部に形成

Fig. 4 Timing of control signals

される液滴の粒径と速度を前述の方法で解析した。図5にその結果を示す。図6は解析領域付近にある噴射開始直後の噴霧の瞬間静止写真を示す。ノズル近くの領域 ($X=1\sim 10$ mm) では、噴霧先端部が通過した直後 ($t=100\ \mu\text{s}$) に形成される液滴は、最大 25 m/s の速度を示すが、粒径には無関係に広い速度分布をもつ。これは、この領域の液滴は、噴霧の液柱部から分裂した直後であるため、いずれの液滴もこの時期大きな運

Fig. 5 Size and velocity correlation of droplets

動量をもっていると思われる。これに対して、 $t=200\sim 300\ \mu\text{s}$ では、液滴は粒径に比例した速度で飛行するが、 $t=600\ \mu\text{s}$ 以降では、いずれの粒径も時間とともに減衰し、この領域で液滴は滞留する。これより下流の $X=11\sim 20$ mm の $t=200\ \mu\text{s}$ では、噴霧の先端部が少し遅れてこの領域を通過するため、やはり粒径と速度の相関はあまりない。これらのことから、液滴は、噴霧先端部の後部に生じる枝構造の近くで形成されていることがわかる。また、時間がたつと液滴は急速に速度を失って噴霧の周辺部に滞留する。

図7は、ノズルからの距離 X と噴霧軸からの距離 Y の領域にある個々の液滴の半径方向速度成分 u_d

Fig. 6 Single-spark photographs of initial diesel spray

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of axial and radial droplet velocities

(噴霧中心軸方向を + 値)と軸方向速度成分 v_a (下流方向を + 値)の時間経過を示す。噴射直後の $t=100 \mu\text{s}$ では、液滴群は大きな速度をもって外側に向かって飛び出す。 $t=300 \mu\text{s}$ では、噴霧先端部の液滴群は大きな速度をもつが、上流にいくほど半径方向速度が減少し、ノズル近くの液滴群は、軸方向速度が遅くなって噴霧内にエントレインされる。噴射率が定常になった $t=600 \mu\text{s}$ 付近では、液滴の速度は全体に小さくなるが、 $X > 15 \text{ mm}$ では、上流側に向かって飛行する液滴が存在する。また、 $t=300 \sim 600 \mu\text{s}$ の $X > 15 \text{ mm}$ で、 v_a の周期的な変動が見られるが、これは、噴霧の枝状構造のピッチに相当することから、この領域で、液滴が盛んに生成されていると考えられる。 $t=1000 \mu\text{s}$ では、ほとんどの液滴の軸方向速度は減衰して、いずれの領域でも液滴は噴霧内にエントレインされる。このとき液滴の軸方向速度は 2 m/s 以下であった。

3・2 周囲気体の流れ 周囲気体の速度解析に先立って、噴霧の発達に伴う周囲気体全体の流れの様子を把握した。図8は、IICCD カメラのゲートを $t_w = 900 \mu\text{s}$ の長期間開放した状態で、噴射開始からの時間 $t=300 \sim 1200 \mu\text{s}$ の間のトレーサ粒子の軌跡を、ノズル近傍(a)と噴霧先端部(b)について示す。ノズル近くでは、周囲気体は、直線的に噴霧に取り込まれ、ガス噴流で見られる流れと同様のパターンを示す⁽¹⁰⁾。これに対して、先端部付近(b)では、周囲気体は、い

Fig. 8 Flow pattern of ambient gas motion using seeding particles ($t_w=900 \mu\text{s}$)

ったん噴霧の外側に向き、さらに上流方向に流されてから噴霧内に取り込まれていることがわかる。

図9は、ノズル近傍で発光間隔を $\Delta t = 300 \mu\text{s}$ に設定して撮影したトレーサ粒子の二重露光像を示す。速度解析には、一つの区画で数回の撮影を行い、約80ペアの粒子を解析対象にした。

図10は、噴霧中心軸から $Y=5 \text{ mm}$ の位置における気体速度の半径方向成分 u_a と軸方向成分 v_a の時間変化をノズルからの距離 X に対して示す。図10から周囲気体速度は、図4で示した液滴速度に比べて約1/10程度であり、 u_a がつねに正であることから周囲気体は噴射開始直後から終了まで噴霧内に取り込まれていることがわかる。また、その速度は、 $t=1000 \mu\text{s}$ 付近で最も速くなり、時間とともにそのピークの位置は下流側に移動する。一方、 v_a について見ると、各時間とも噴霧の上流側では、噴霧の発達と同じ方向を示すが、下流側の気体は、上流方向に流れていることがわかる。噴射直後では、 v_a が零となる位置は、

Fig. 9 Double exposure images of seeding particles ($t=300 \mu\text{s}$, $\Delta t=300 \mu\text{s}$)

Fig. 10 Axial and radial ambient gas velocity

Fig. 11 Velocity vectors of droplets and ambient gas

各時間の噴霧の到達距離の 1/3 の位置に相当し、この位置で半径方向速度 u_a が減速し始める。また、噴射後期の $t=2000\ \mu\text{s}$ では、 v_a はつねに正の値をもつことから、この時期、周囲気体はどの位置でも噴霧主流部と一体になって流れていることがわかる。

これらのことから、静止気体中に噴射された噴霧周囲には、噴霧主流部の通過によって直接噴霧内に引き込まれる流れと、噴霧前方にある気体が噴霧先端部に押しのけられて、上流側に循環する大きなスケールの渦が存在することがわかる。

3・3 液滴速度と周囲気体速度の二次元分布 図 11 は、噴射からの時間 t を変更したときの液滴と周囲気体の速度ベクトルを二次元表示したものである。 $t=100\ \mu\text{s}$ では、噴霧先端部は、 $X=10\ \text{mm}$ 付近まで到達しているが、液滴の存在する領域は上流部に限られ、大きな速度で同じ方向に飛び出す。周囲気体は液滴群に対向して流れ、その速度は、液滴速度に比べてほぼ 1 けた小さい。 $t=200\ \mu\text{s}$ では、噴霧の発達とともに液滴の存在する範囲が下流側に広がり、ノズル近くでは、噴霧にエントレインされる液滴も見られる。一方、上流部の周囲気体は速度が大きくなり、また下流部では、上流向きの流れが主体になって、 $X=10\ \text{mm}$ の領域で噴霧によってエントレインされる上流部の流れと噴霧先端部で上流側へ循環する流れの二つの流れが合流する。時間の経過につれて、速度の大きい液滴群の領域は、下流部に移行して、気体との相対速度も大きくなり、大きな速度をもった液滴群の領域で気体の導入が盛んであることがわかる。 $t=600\ \mu\text{s}$ になると、噴霧主流部と平行して飛行する液滴が多くなり、上流

部では、液滴は周囲気体の流れに乗って取り込まれる。噴射終わりの $t=2000\ \mu\text{s}$ になると、液滴速度は小さくなって、周囲気体とともに噴霧に取り込まれる。また、ノズル近傍の液滴に大きな速度が見られるのは、噴射終了時に大きな液滴が発生するためである。

図 12 は、噴射開始からの各時間における液滴と周囲気体との相対速度について、噴霧軸から $Y=5\ \text{mm}$ の位置での半径方向成分 u_d-u_a と軸方向成分 v_d-v_a をノズルからの距離 X に対して示す。噴射初期の $t=100\ \mu\text{s}$ では、半径方向、軸方向とも相対速度が大きく、噴霧先端部に行くほど増加する。このことから、噴霧の分裂は、噴霧先端部後流の枝状構造部で起こり、生成された直後の液滴が、大きな速度をもっていることがわかる。この傾向は、噴射率が定常になる $t=600\ \mu\text{s}$ 付近まで続くが、半径方向成分の相対速度はしだいに小さくなり、噴射後期には、液滴と周囲気体との相対速度はなくなって、液滴は、周囲気体に乗って噴霧主流部に導入されるようになる。

4. 結 論

ナノ秒ダブルスパーク光源法と Ar レーザシートパルス光源法とを開発して、高圧常温気体中に噴射されたディーゼル噴霧の液滴群と周囲気体の速度ベクトルの空間・時間分布を明らかにした。その結果、次のことがわかった。

(1) 燃料液滴は、噴霧先端部後部の枝状構造で生成され、生成直後の液滴は液滴径に関係なく、広い範囲の速度をもちその最大速度は約 $20\ \text{m/s}$ となるが、その後急速に減衰する。

(2) 噴射初期の液滴は、大きな速度で噴霧から飛び出す。噴霧の発達とともに、大きな速度をもつ液滴群の領域は下流側に移動する。

(3) ノズル近傍の液滴群は、噴射開始後 $t=200\ \mu\text{s}$ で噴霧内に取り込まれ、噴射中期の $t=1000\ \mu\text{s}$ では、ほとんどの液滴群は、軸方向速度を失って噴霧内にエントレインされる。

(4) 噴霧周囲には、噴射される噴霧によって誘起される流れと、噴霧先端部で押し出されて生成される大きなスケール渦の二つの流れが存在し、周囲気体の速度は液滴速度の約 1/10 である。

(5) 上記の二つの流れは、噴霧の到達距離の約 1/3 の領域で合流し、この合流域の下流側に大きな速度をもつ外向きの液滴群が存在することから、液滴と周囲気体の混合がこの領域で盛んに起こっていると考えられる。

Fig. 12 Relative velocity of droplets and ambient gas

終わりに、本研究の一部は、日本機械学会研究分科会 RC 133 および笹川科学研究助成の補助を受けて行ったものである。また、実験装置の製作に協力していただいた、機械工学科技官 志摩俊郎氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 梅津清二・村上昭年, 機論, 57-544, B(1991), 310-315.
- (2) 横田治之・ほか 2 名, 自技論, No.43(1990), 52-57.
- (3) 石川直也・新村恵一, 自技論, No.2(1996), 57-62.
- (4) Ha, J. Y., ほか 5 名, *SAE Paper*, No.830451(1983).
- (5) Koo, J. Y. and Martin, J. K., *SAE Paper*, No. 900397(1990).
- (6) Obokata, T. and Hashimoto, T., *Proc. COMODIA90*, (1990), 231-236.
- (7) 和栗雄太郎・ほか 3 名, 機論, 25-156(1959), 820-826.
- (8) 劉育民・ほか 2 名, 機論, 61-585, B(1995), 360-366.
- (9) Mohammadi, A., ほか 3 名, 第 13 回内燃機関シンポジウム講演集, (1996), 55-60.
- (10) Tomita, T., ほか 3 名, *SAE Paper*, No.950056(1995).