ディーゼル噴霧の性状に関する研究

第2報 単一噴霧への流入空気について*

国吉 光**・山本英継***
藤本 元****・佐藤 豪****

Investigation on the Characteristics of Diesel Fuel Spray
(2nd Paper; The Air Entrainment into the Spray)

By Hikaru Kuniyoshi, Hidetsugu Yamamoto, Hajime Fujimoto, G. Takeshi Sato

This paper presents some results of an experimental investigation on the air movement around the injected diesel fuel spray. The single shot fuel spray was injected into a high pressure chamber charged the high pressure and room temperature air. The volume of the chamber is large enough to avoid the influence of the surrounding walls.

The air movement around the injected fuel spray was measured by the "smoke wire" method using highspeed camera and consequently the air entrainment was achieved quantitatively.

The following conclusions can be drawn in this investigation:

- (1) The air entrains almost normally into the penetration part of the spray and the air around dilution part is pushed aside by the spray.
- (2) The air velocity around the spray decreases as the ambient pressure increases.
- (3) The air velocity becomes slower as the distance from the nozzle tip longer and at the end of penetration part it becomes nearly equal to zero.
- (4) The volume of air entraining into the penetration part of the spray is about a half of the apparent spray volume independent on the ambient pressure and time from injection start.

1. はじめに

ディーゼル機関の噴霧の燃焼を考えると、噴霧周辺の空気流動と、その噴霧内への流入が、混合気の形成に重要な要因となる。

従来、大気圧における定常噴流については、噴流の周囲空気の流動を求めた研究^{1~6)}がある。しかし、ディーゼル噴霧のような非定常の気液二相流については、わずかに広安ら⁷⁾がオイルミストをトレーサとして空気流動を求めた例があるだけで、研究されていない。

筆者らは、第1報⁸⁾の実験装置を用いて、周囲圧力が $11 \sim 101 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ の範囲で、周囲が比較的広い、常温の静止空気中に、燃料を単一噴口から1回噴射して、その噴霧の周辺の空気流動を求めた⁹⁾。本報では、測定方法として、噴霧に影響をおよぼさないこと、現象が非常に短い時間の非定常であることを考慮してスモーク

ワイヤ法¹⁰⁾を用い、噴霧周辺の空気流動を、煙をトレーサとして可視化した。このトレーサの動きを高速度写真撮影し、写真より流速や方向を測定し、噴霧への流入空気を求めた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法は、第1報⁸⁾と同じである。すなわち、高压容器は内径 $\phi 200 \text{ mm}$ 、高さ 500 mm 、容積 $15.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ で、容器内に噴射された噴霧は、容器内壁の影響を受けない。燃料は、電動機で駆動する燃料噴射ポンプにより、燃料噴射弁から高压容器内に、1回だけ噴射される。

スモークワイヤ法を用い、その煙をトレーサとして噴霧周辺の空気流動を可視化した。本実験では、スモークワイヤとして線径 $\phi 0.1 \text{ mm}$ のニクロム線を用い、図1(a)のように噴霧軸に直角に張った場合と、(b)のように噴霧円錐の母線に平行に張った場合について実験した。(a)の場合は、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z = 25 \text{ mm}$ および 100 mm の位置に、スモークワイヤを張った。(b)の場合は、長さ 200 mm のスモークワイヤを噴霧面から $3 \sim 5 \text{ mm}$ 離れた位置に、間隔 3 mm で4本張った。

* 原稿受付 昭和52年12月1日

昭和52年秋季学術講演(昭和52年10月26日)

** 学生会員 慶応義塾大学工学部(横浜市港北区日吉3-14-1)

*** 学生会員 慶応義塾大学大学院(横浜市港北区日吉3-14-1)

**** 正会員 慶応義塾大学工学部(横浜市港北区日吉3-14-1)

図1 スモークワイヤの張り方

スモークワイヤに油を塗布し、スモークワイヤに短時間(数ms程度)大きな電流を流すと、油は発煙する。煙は時間とともに拡散して観察しにくくなるため、通電は噴射前50~70msに行なった。煙をトレーサとして噴霧周辺の空気流動を、フィルム速度2,000~4,000コマ/秒で16mm高速度写真撮影した。

3. 実験条件

本報では燃料噴射系の条件を一定にして、高压容器内の圧力、すなわち噴霧の周囲圧力を11, 26, 41, 64, $101 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ {1.08, 2.55, 4.02, 6.28, 9.91MPa}の範囲で変化させ、常温の静止空気中で実験を行なった。

燃料および燃料噴射弁は、第1報⁸⁾と同じである。すなわち、燃料には、比重0.831, 動粘度3.04 cSt ($3.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)/30℃の市販JIS1種重油(A重油)を用

いた。燃料噴射弁には、噴口数11, 噴口径0.29mmのものを用い、開弁圧は $380 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ {37.3MPa}, 燃料噴射量は0.98g, 燃料噴射期間は9.0msである。

4. 実験結果

4.1 噴霧周辺の空気流動 噴霧と噴霧周辺の空気流動の高速度写真の一例を図2に示す。

図2(a)は、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z=100 \text{ mm}$ の位置に、スモークワイヤを噴霧軸に直角に張った場合である。噴霧の先端がスモークワイヤ上のトレーサに近づく、噴霧軸上付近のトレーサは、噴霧の進行方向に押される。このトレーサと噴霧先端の動きをフィルム解析により求めたのが、図3である。押されて動くトレーサの速度より噴霧先端の速度の方が大きいため、噴霧はトレーサに追いつき、噴霧の滞留部⁹⁾の中にトレーサを取り入れる。

トレーサが噴霧の影響をうけて動きはじめるときの、噴霧先端とトレーサの距離 l_t は、図4に示すように周囲圧力 P_a が $101 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ {9.91MPa}では、 l_t はおよそ15mmである。

噴霧軸上でのトレーサの軸方向速度 u_{at} は、図4に示すように周囲圧力 P_a が高くなると小さくなる。

図2(b)のようにスモークワイヤを噴霧円錐の母線に平行に張った場合は、つぎのような結果が得られた。ある程度噴霧が形成された後、噴霧の滞留部が近づく、トレーサは噴霧に対して外側に押されて動く。一方、噴霧の貫通部⁹⁾では、トレーサは噴霧に向かって、噴霧軸にほぼ直角に動く。すなわち、噴霧は貫通部において、周辺空気を噴霧軸にほぼ直角に吸引する。滞留部では、周

図2 噴霧周辺の空気流動($d_{PV}=0.29 \text{ mm}$)

図3 噴霧先端付近のトレーサの動き

図4 噴霧軸上でのトレーサの軸方向速度

辺空気を押しわけけるが、その空気の一部は噴霧へとり入れられる。

4.2 周辺空気の流れ 図2(b)の場合のフィルムを解析してトレーサの動きを求めると、図5となる。これは周囲圧力 P_a が $64 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ (6.28 MPa)、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z = 40 \text{ mm}$ の位置におけるトレーサの動きを示している。

トレーサの動きより、噴霧の半径方向の周辺空気の流れ(噴霧軸に向う方向を正とする)を求めた一例を図6に示す。周囲圧力 P_a が $64 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ (6.28 MPa)、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z = 40 \text{ mm}$ の位置における周辺空気の流れを示している。周辺空気の流れ u_a は噴霧面に近づくほど大きくなる。噴射開始からの時間 t とともに u_a は負から正になり大きくなるが、この場合、およそ 4 ms 以後では速度分布は一定となる。 P_a および Z が変わっても、同様の傾向が認められた。

周囲圧力 P_a をパラメータとして、図6と同様な周辺

図5 周辺空気の動き

図6 噴射開始からの時間をパラメータとした周辺空気の流れ

図7 周囲圧力をパラメータとした周辺空気の流れ

空気の流れ分布を示したのが図7である。これは、噴射開始からの時間 $t = 3 \text{ ms}$ 、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z = 25 \text{ mm}$ の場合であるが、周辺空気の流れ u_a は、 P_a が高くなるほど小さくなる。 t および Z が変わっても、同様の傾向が認められた。

4.3 流入空気の流れ 図6あるいは図7において、噴霧軸に向って延長した線と噴霧面の交点での周辺空気の流れを、流入空気の流れ u_i と定義する。

図8および図9に、噴霧軸方向の流入空気の流れ u_i の変化を示す。流入空気の流れ u_i は、噴口に近いほど大きい。図6に示したように、 u_a は滞留部では負の値となる。 u_a が零になる噴口から長さは、貫通部の長さ

図8 流入空気の流れ

図9 流入空気の流れ

図10 流入空気の流れと周囲圧力との関係

l_p とほぼ一致している。これより、噴霧は貫通部において、周囲空気を吸引していることがわかる。

図8は、周囲圧力 P_a が $64 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ (6.28 MPa) の場合であり、図9は P_a が $101 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ (9.91 MPa) の場合である。 P_a が低いほど、噴射開始から短い時間で、 u_s は一定となる。

図10に噴射開始からの時間 $t = 4 \text{ ms}$ 、噴口から噴霧軸方向の距離 $Z = 25 \text{ mm}$ の場合の流入空気の流れ u_s と周囲圧力 P_a の関係を示す。 P_a が高くなると、 u_s は小さくなる。この傾向は、 t および Z が変化しても同様である。

4.4 流入空気の体積 噴霧の円錐面上の単位幅 (1 mm) の円環から噴霧内へ流入する空気量を、流入空気の流れ u_s より計算した一例を、図11に示す。噴射開始からの時間 t が経過するにしたがって噴霧が発達し、流入空気の流れが増加して、単位幅あたりの流入空気量 q は大きくなる。

単位幅あたりの流入空気量 q と、噴霧円錐の側面積より算出した流入空気の体積流量 Q を図12に示す。周囲圧力 P_a が高くなると、流入空気の流れ u_s は遅くなり、さらに、噴霧の貫通部すなわち流入する面積も小さくなって、 Q は小さくなる。

図12の流入空気の体積流量 Q を時間に対して積算し、流入空気の体積 V を計算した。第1報⁸⁾で求めた相当噴霧体積 V_s と流入空気体積 V の比較を、図13に示す。周囲圧力 P_a が高くなると、 V は小さくなる。

周囲圧力および噴射開始からの時間によらず、相当噴霧体積 V_s は流入空気体積 V より大きい。前述したように、噴霧は滞留部において周囲空気を押しわけているが、その空気の一部は噴霧へとり入れられる。 V は噴霧の貫通部において流入した空気の体積であるから、滞留部において噴霧へとり入れられる体積は、

$$V_s - V$$

である。

図11 単位幅あたりの流入空気量

図12 流入空気の体積流量

図 13 流入空気体積

図 14 流入空気体積と相当噴霧体積

図 15 流入空気の重量

流入空気体積 V と相当噴霧体積 V_s の比は、図 14 に示すように噴射開始からの時間および周囲圧力によらず、ほぼ $V/V_s \approx 1/2$ である。

流入空気体積 V より求めた流入空気の重量 G と、第 1 報⁸⁾で求めた噴霧内の空気重量 G_{sa} の比較を図 15 に示す。

周囲圧力 P_a が高くなると、 G は大きくなる。流入空気体積の場合と同様に、 G/G_{sa} は、噴射開始からの時間 t および P_a によらず、ほぼ

$$G/G_{sa} \approx 1/2$$

である。

5. ま と め

本研究では、燃料噴射系が一定で、周囲が比較的広い、常温、高圧の静止空气中に噴射された単一のディーゼル噴霧の周辺の空気流動について求め、つぎの結論を得た。

(1) 噴霧は、貫通部では周辺空気を噴霧軸にほぼ直角に吸引する。滞留部では、周辺空気を押しわけが、その空気の一部は、噴霧へとり入れられる。

(2) 噴霧周辺の空気速度は、噴口に近づくほど大きくなる。

(3) 噴霧周辺の空気速度は、周囲圧力が高くなるほど小さくなる。

(4) 噴霧面上の流入空気速度の噴霧軸方向の分布は、噴口に近いほど大である。

(5) 貫通部における噴霧への体積流量は、周囲圧力が高いほど小さい。

(6) 流入空気体積 V は相当噴霧体積 V_s より小さく、その体積の差は、噴霧の滞留部でとり入れられた空気の体積と考えられる。また、 V/V_s は、噴射開始からの時間および周囲圧力に関係なく、ほぼ

$$V/V_s \approx 1/2$$

である。

以上により、ディーゼル噴霧の燃焼に関係の深い噴霧周辺の空気流動および噴霧への流入空気について、定量的に求めた。特に、着火に最も関係の深いと思われる流入空気の状態を明確にした。

最後に、本実験装置は、三井造船(株)の援助により作製され、本研究の一部は、文部省特定研究「自動車の排気浄化に関する基礎研究」および日本自動車研究所燃焼と排気委員会の助成によって行なわれた。本実験を行なうに際しては、当時、慶応義塾大学工学部大学院学生、瀬古俊之、同学部学生、富田公夫の諸君の協力を得た。あわせて、ここに厚く感謝の意を表す。

文 献

- 1) Ricou, F. P., J. Fluid Mech., 11-21 (1961), 21
- 2) Hill, B. J., J. Fluid Mech., 51-4 (1972), 773
- 3) Briffa, E. J., A. I. Che. E. J., 12-4 (1966), 708
- 4) Eisenklam, P., J. Inst. Fuel, 42-343 (1969), 309
- 5) 国吉・佐藤・ほか 5 名, 液体の微粒化に関する講演会前刷, (昭 51-5), 57
- 6) 伊藤, 機論, 36-285 (昭 45-5), 759
- 7) 広安・ほか 2 名, 機論, 730-17 (昭 48-10), 257
- 8) 佐藤・ほか 2 名, 船機誌, 13-5 (昭 53-5), 357
- 9) Fujimoto, H., Sato, G. T., et al, 12th CIMAC, (1977-5), 1853
- 10) 鳥居, 流れの可視化シンポジウム前刷, (昭 50-7), 5