2波長レーザ光吸収・散乱光度法によるディーゼル噴霧内 燃料蒸気・液滴濃度分布の分離計測*

(第3報, 噴霧内への雰囲気導入特性)

鈴木 護^{*1}, 西田 恵哉^{*2}, 廣安 博之^{*2}

Simultaneous Measurement of Fuel Vapor Concentration and Droplets Density in an Evaporating Diesel Spray with Laser Light Absorption and Scattering (3rd Report, Analysis of Entrainment Characteristics of Ambient Gas into an Evaporating Diesel Spray)

Mamoru SUZUKI, Keiya NISHIDA and Hiroyuki HIROYASU

The characteristics of the ambient gas entrainment into an evaporating diesel spray were analyzed by using the results of the distributions of fuel vapor concentration and droplets density, which were measured by the new technique developed in this study. It was found that the characteristics of the ambient gas entrainment was strongly affected by the ambient gas temperature and impingement distance. The total mass of the ambient gas entrained into the evaporating spray impinging on a flat wall was greater than that of the free spray at the same time from when the injection started. In the case of the impinging spray, the optimum impinging distance exists for facilitating the entrainment of the ambient gas.

Key Words: Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Digital Image Processing, Fuel Spray, Fuel Vapor Concentration, Droplets Density, Ambient Gas Entrainment, Excess Air Ratio

1. 緒 言

直接噴射式ディーゼル機関において、燃焼室壁面に衝突する前後の噴霧内燃料液滴の分散および蒸発、燃料蒸気と空気との混合気形成過程は機関性能、排気特性に大きく影響する。燃料噴霧と燃焼室形状との組合せにより、混合気形成を最適化することが、ディーゼル機関の性能を改善するうえで重要な課題である。

たとえば、深皿形ピストンでは噴霧を壁面にほぼ垂直に衝突させることによって浅皿形ピストンの壁面に沿わせる方式に比べて燃焼が改善されたという報告⁽¹⁾がある。また、リエントラント形ピストンの燃焼室の内側に突起を設けた燃焼室(TRB 燃焼室)を用い、スキッシュとスワールとの複合流によって噴霧内への空気導入を活発にして燃焼を改善したという報告⁽²⁾もある。

さらに近年燃焼室などのハードウェアの改良でなく、燃料の高圧噴射による燃焼改善が積極的に行われているが^{(3)~(6)}、これは燃焼系の最適化を伴えば NO_x とパティキュレートのトレードオフの関係を大幅に改

善するポテンシャルを有するものである。高圧噴射により噴霧内への空気導入および燃料-空気の混合を促進させ、パティキュレートの発生を抑えると同時に噴射時期遅延と組合せて NO_x 排出量を低減させることが可能である。

ディーゼル燃焼においては、噴霧内への空気導入特性が燃焼過程に非常に深い関係があることが知られている。ディーゼル噴霧内への空気導入率について、常温高圧雰囲気中の非蒸発のディーゼル噴霧に関しては報告例があるが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、高温高圧雰囲気中に噴射された蒸発過程にあるディーゼル噴霧内への空気導入率の定量的解析はほとんど行われていない。

そこで著者らは、既報⁽⁹⁾で報告した蒸発過程にあるディーゼル噴霧内の燃料蒸気・液滴濃度分布の分離計測方法によって得られた結果より、噴霧内に導入される雰囲気量の定量的解析を行い、雰囲気導入特性におよぼす雰囲気温度、衝突距離などの影響について調べた。

2. 噴霧内への雰囲気導入量の解析

噴霧内に導入される雰囲気については、既報⁽¹⁰⁾において開発された蒸気過程にあるディーゼル噴霧内の燃料液滴・蒸気濃度分布および混合気温度解析方法に

* 原稿受付 平成4年12月28日。

^{*1} 正員, 広島大学大学院 (〒724 広島市鏡山1-4-1)。^{*2} 正員, 広島大学工学部。

より求めた結果を用いて、以下のような考え方に基づき解析を行い、最終的には噴霧内の局所における空気過剰率分布という形で表現した。

まず、蒸発噴霧内の単位体積 $V[\text{m}^3]$ に燃料液滴が $C_d[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、燃料蒸気が $C_v[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、雰囲気気が $C_a[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、存在するとし、3成分を考慮した単位体積内における状態方程式を次式のように与える。

$$P_a \cdot \left(1 - \frac{C_d}{\rho_l}\right) \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T_{\text{mix}} + Z_v \cdot m_v \cdot R_v \cdot T_{\text{mix}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

- P_a : 雰囲気気圧力 MPa
 C_d : 噴霧内燃料液滴濃度 kg/m^3
 ρ_l : 燃料液滴密度 kg/m^3
 m_a : 雰囲気気質量 kg
 m_v : 燃料蒸気質量 kg
 R_a : 雰囲気気的气体定数 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 R_v : 燃料蒸気的气体定数 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 Z_v : 燃料蒸気の圧縮係数
 T_{mix} : 噴霧内混合気温度 K

高温高圧雰囲気中における燃料蒸気の状態方程式は、圧縮性を考慮して Soave⁽¹¹⁾ によって修正された Redlich-Kwong⁽¹²⁾ の状態方程式を採用した。式(1)を、雰囲気について解くことにより、単位体積内における雰囲気気質量 $C_a[\text{kg}/\text{m}^3]$ が次式で求まる。

$$C_a = \frac{\frac{P_a}{T_{\text{mix}}} \left(1 - \frac{C_d}{\rho_l}\right) - Z_v \cdot C_v \cdot R_v}{R_a} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

C_v : 噴霧内燃料蒸気濃度 kg/m^3

以上より噴霧内空気過剰率は以下の式で表せる。

$$\lambda = \frac{1}{AF_{\text{stoich}}} \cdot \frac{C_a}{C_d + C_v} = \frac{1}{AF_{\text{stoich}}} \cdot \frac{\frac{P_a}{T_{\text{mix}}} \left(1 - \frac{C_d}{\rho_l}\right) - Z_v \cdot C_v \cdot R_v}{R_a \cdot (C_d + C_v)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

AF_{stoich} : 理論空燃比

なお、空気過剰率 $\lambda=5$ を燃料噴霧と雰囲気との境界とし、 $\lambda<5$ の領域における雰囲気気と燃料蒸気の総質量を噴霧内への導入雰囲気気量 $M_a[\text{kg}]$ とした。またその領域内に存在する燃料蒸気および燃料液滴の総質量をそれぞれ $M_v[\text{kg}]$ 、 $M_d[\text{kg}]$ とした。さらに、そのときの噴霧体積を $V_s[\text{m}^3]$ 、噴霧内に存在するすべての燃料蒸気、液滴に対する総合当量比を ϕ_{all} とした。

3. 実験条件

表1に、本研究のおもな実験条件を示す。雰囲気条件は、雰囲気温度 $T_a=773\text{ K}$ 、雰囲気圧力 $P_a=2.9\text{ MPa}$ における雰囲気密度 $\rho_a=12.5\text{ kg}/\text{m}^3$ を基本とし、雰囲気温度、雰囲気圧力をそれぞれ変化させた同一雰囲気密度の窒素雰囲気中で実験を行った。使用した噴射ノズルは、噴孔径 $d=0.25\text{ mm}$ 、噴孔長/噴孔径比 $l/d=6$ の単孔ホールノズルで、開弁圧力は $P_0=19.6\text{ MPa}$ 、噴射ポンプの回転数は $n_p=750\text{ rpm}$ 、噴射量は $m_f=21.7\text{ mg}$ と一定にした。また、衝突噴霧の場合の衝突角度は $\theta_w=0^\circ$ (壁面に対して垂直に衝突) とし、衝突距離を $L_w=15, 25, 35\text{ mm}$ と変化させた噴霧における燃料蒸気および液滴濃度分布の測定結果をもとに、噴霧内雰囲気導入特性の解析を行った。

図1は、自由噴霧および垂直衝突噴霧に関する記号を示したものである。自由噴霧の場合、噴射ノズル先端から解析位置までの距離を Z 、垂直衝突噴霧の場合、噴射ノズル先端から衝突壁面までの距離を L_w 、壁面から解析位置までの距離を Z_w とした。また、噴霧軸からの噴霧半径方向距離を r とした。

表1 実験条件

Ambient Gas		Nitrogen
Ambient Temperature	T_a	773, 673, 573, 293 K
Ambient Pressure	P_a	2.9, 2.5, 2.2, 1.1 MPa
Ambient Density	ρ_a	12.5 kg/m^3
Injection Nozzle		Hole Nozzle
Number of Hole		1
Nozzle Diameter		d 0.25 mm
l/d		6
Valve Opening Press.		P_0 19.6 MPa
Pump Speed		n_p 750 rpm
Amount of Fuel Injected		m_f 21.7 mg
Injection Duration		t_{inj} 2.9 ms
Impingement Distance		L_w 15, 25, 35 mm
Impingement Angle		θ_w 0 deg.

図1 噴霧における各記号

図2 空気過剰率分布におよぼす雰囲気温度の影響

図3 空気過剰率の噴霧半径方向分布

図4 燃料蒸気・液滴, 雰囲気気の噴霧内総質量

4. 実験結果および考察

4・1 雰囲気温度の影響 図2は, 雰囲気温度が $T_a = 293$ K の非蒸発噴霧内および, 雰囲気温度が $T_a = 573, 673, 773$ K の蒸発噴霧内の噴霧軸を含む垂直断面内の空気過剰率分布を示したものである。また図3は, ノズル先端からの距離 $Z = 40$ mm の位置における空気過剰率の噴霧半径方向分布を示したものである。

雰囲気温度の上昇とともに, 燃料液滴の蒸発およびその燃料蒸気の拡散により燃料の存在する噴霧幅は広がり, その噴霧外縁部および先端部, すなわち燃料液滴の蒸発が進み燃料蒸気濃度が高くなる位置において, 空気過剰率が高い値を示しているのがわかる。また, $Z = 40$ mm の位置における空気過剰率の半径方向分布をみると, 雰囲気温度の上昇に伴い噴霧内部においても空気過剰率が高い値を示している。

図4は, 各雰囲気温度における噴射開始後 $t = 1.2$

ms で噴霧内に存在する燃料蒸気, 燃料液滴および噴霧内に導入される雰囲気気の総質量を示したものである。雰囲気温度の上昇に伴い燃料液滴の蒸発が進み噴霧内の燃料液滴の総質量が減少すると同時に燃料蒸気の総質量が増加する。また, 雰囲気温度の上昇に伴い, 燃料液滴の蒸発に伴い噴霧の体積膨張が生じ, 周囲気体の抵抗が増大し噴霧の到達距離が減少することによって, 噴霧全体としての雰囲気気導入量が増加する。

図5は, 各雰囲気温度における総合当量比と噴霧体積について示したものである。非蒸発噴霧に比べて蒸発噴霧では, 噴霧外縁および先端における蒸発した燃料蒸気の雰囲気への拡散による体積膨張により, 噴霧体積は増加する。また, 雰囲気温度の上昇に伴い噴霧内に存在する燃料蒸気の総質量は増加するが, 雰囲気気の導入量も増加するため, 噴霧内のすべての燃料に対する総合当量比は, 逆に減少する傾向にある。

図6は, ある範囲の空気過剰率の領域($\Delta\lambda = 0.1$)に

図5 総合当量比と噴霧体積

図6 M_{ax}/M_a におよぼす雰囲気温度の影響

存在する雰囲気気の質量 M_{ax} に対する噴霧内に存在する雰囲気気の総質量 M_a の質量割合 M_{ax}/M_a が各雰囲気温度においてどのような分布になっているか示したものである。雰囲気温度の上昇に伴い、質量割合 M_{ax}/M_a のピーク値は減少し空気過剰率の高い方向に分布が推移して全体的に低くなだらかな分布となり、噴霧内への空気導入、すなわち燃料-空気の混合が促進されていることがわかる。

4.2 衝突距離の影響 図7は、高温高圧雰囲気中に平板を置き、それに対して垂直に衝突するディーゼル噴霧 ($\theta_w=0^\circ$) に対して、衝突距離を $L_w=15, 25, 35$ mm と変化させた場合の噴霧内雰囲気導入特性の違いについて解析した結果である。各解析結果とも同一雰囲気条件 $T_a=773$ K, $P_a=2.9$ MPa, 同一噴射ノズル $d=0.25$ mm, $l/d=6$ で噴射開始後 $t=2.4$ ms におけるものである。

各衝突距離において、壁面衝突噴霧の未衝突部は雰囲気導入量が少なく空気過剰率で $\lambda < 0.2$ の領域がほとんどであるが、衝突後の衝突壁面上では雰囲気気の導

図7 空気過剰率分布におよぼす衝突距離の影響

図8 燃料蒸気・液滴、雰囲気気の噴霧内総質量

入が活発で、空気過剰率も大きな値を示すようになる。特に、衝突距離が $L_w=25$ mm の場合、雰囲気気の導入が活発で、空気過剰率 $1.0 < \lambda$ の領域が多く存在しているのがわかる。

図8は、衝突噴霧内に存在する燃料液滴と燃料蒸気の総質量、および噴霧内に導入される雰囲気気の総質量におよぼす衝突距離の影響について解析した結果を示したものである。衝突距離が増加するにしたがい、噴霧は微粒化が進行し運動量も低下した液滴数密度の低い状態で壁面に衝突するようになり、燃料液滴の蒸発が促進されるため、噴霧内に存在する燃料液滴の総質量は減少し燃料蒸気量は増加する。また、噴霧内に導

図9 総合当量比と噴霧体積

図10 M_{ax}/M_a におよぼす衝突距離の影響

入される雰囲気量は、衝突距離を $L_w=35, 25$ mm と小さくするにしたがい増加するが、さらにノズル先端と衝突壁面を近づけた $L_w=15$ mm では、最も小さい値を示す。

非蒸発噴霧の壁面衝突における解析結果では、衝突距離を短くすることにより噴霧内に導入される雰囲気量は増加するという報告⁽⁶⁾があるが、本研究における蒸発噴霧の場合、図8に示すように非蒸発噴霧の場合とは異なる傾向にある。

衝突距離が $L_w=15$ mm と $L_w=35$ mm との比較では、衝突距離が増加するにつれて燃料液滴の蒸発が促進され、図9に示すように燃料蒸気の雰囲気への拡散により噴霧体積が増加し、噴霧全体としての雰囲気導入量が増加するものと考えられる。また、衝突距離が $L_w=25$ mm においては、燃料液滴の蒸発促進による噴霧体積の増加と、衝突後の壁面上における噴霧内の渦運動が活発であるという二つの要因が兼ねあわさって噴霧内への雰囲気導入量が最大を示したもののと思わ

図11 自由噴霧と垂直衝突噴霧との比較

れる。また、噴霧内の総合当量比についても、衝突距離が $L_w=25$ mm の場合が $\phi_{all}=1$ に近く最小で燃料と雰囲気気の混合状態が最良であることがわかる。

図10は、 M_{ax}/M_a の分布を各衝突距離について示したものである。衝突距離 $Z_w=25$ mm の場合、 $Z_w=15, 35$ mm と比較して、分布の中心が空気過剰率1に近く最適な混合が行われていることがわかる。

したがって、蒸発過程にある壁面衝突ディーゼル噴霧内での雰囲気導入および混合気形成においては、雰囲気条件、噴射系および噴射条件で最適な衝突距離、すなわち実機の燃焼室内に置き換えると最適なピストンキャビティ形状が存在することがわかる。

4・3 自由噴霧と垂直衝突噴霧との比較 図11は、同一雰囲気条件中に同一噴射条件にて噴射されたディーゼル噴霧に対して、壁面に衝突させた垂直衝突噴霧 ($L_w=25$ mm) と壁面のない自由噴霧 ($L_w=\infty$ mm) において、噴射開始から同一時刻 $t=1.2$ ms での噴霧中心軸を含む垂直断面における空気過剰率分布を比較したものである。自由噴霧に関しては、噴霧先端部の燃料液滴の蒸発がさかんな位置において空気過剰率が高い値を示すのに対して、衝突噴霧では、壁面上の噴霧先端域の燃料蒸気濃度が高い位置ではなく、噴霧上方の雰囲気気の巻き込みが活発だと思われる位置において空気過剰率が高い値を示す。

また図12は、両噴霧のノズル先端からの距離 $Z=22.5$ mm (衝突噴霧の場合、壁面からの距離 $Z_w=2.5$ mm) における空気過剰率の噴霧半径方向分布を比較したものである。衝突噴霧の場合、未衝突部分の噴霧

図 12 空気過剰率の噴霧半径方向分布

図 13 燃料蒸気, 雰囲気気の噴霧内総質量, 総合当量比と噴霧体積

中心軸付近の空気過剰率分布は, 自由噴霧のそれとほとんど値が同じであるが, 衝突後壁面上において噴霧内への雰囲気気導入が活発で空気過剰率が全体的に高い値を示す。特に未衝突噴霧のすぐ外側($r=5.0$ mm)において極大値をもつ。

図 13 は, 噴霧内に存在する燃料蒸気および雰囲気気の総質量, 総合当量比, 噴霧体積について, 自由噴霧と衝突噴霧で比較を行ったものである。壁面に衝突させることによって, 噴霧体積, 噴霧内燃料蒸気量, 雰囲気気導入量, 総合当量比とも増加する。衝突噴霧の場合,

図 14 $M_{a\lambda}/M_a$ におよぼす衝突壁面の影響

合, 壁面上における燃料噴霧の接触面積が大きくなり, 高温の衝突壁面から噴霧内への熱の伝達により燃料液滴の蒸発は促進され⁽¹³⁾, 燃料蒸気量は増加する。また, 衝突壁面上の噴霧先端域において生じる渦運動^{(14)~(16)}などにより, 噴霧内への雰囲気気導入は活発になるが, 液滴蒸発促進のほうが影響が大きく, 衝突噴霧において総合当量比が増加するものと思われる。

図 14 は, $M_{a\lambda}/M_a$ の分布を, 自由噴霧と衝突噴霧とで比較を行ったものである。両者の分布形状に大きな差異は認められないが, 空気過剰率 λ が小さいところでは衝突噴霧のほうが $M_{a\lambda}/M_a$ は大きく, 空気過剰率 λ が大きいところでは自由噴霧のほうが大きな値を示す。

5. 結 論

蒸発過程にあるディーゼル噴霧内の燃料蒸気・液滴濃度分布の測定結果を用いて, 噴霧内に導入される雰囲気気量の定量的解析を行い, 雰囲気気導入特性に影響する諸因子について調べた結果以下のような結論が得られた。

(1) 蒸発噴霧内へ導入される雰囲気気量は, 雰囲気気温度が上昇するとともに増加し, 噴霧内の総合当量比は雰囲気気温度上昇に伴い減少する。

(2) 衝突噴霧においては, 非蒸発噴霧の結果とは異なり, 噴霧全体に導入される雰囲気気量が最大となる衝突距離が存在する。また噴霧内の総合当量比は, その雰囲気気導入量が最大となる衝突距離において最小値を示す。

(3) 衝突噴霧の場合, 自由噴霧と比較して燃料噴霧内に含まれる燃料蒸気量, 雰囲気気質量とも大きな値を示す。また, 噴霧内の総合当量比も衝突噴霧のほうが大きな値を示す。

本研究を遂行するにあたり, 岡峰克幸氏(当時本学学部生, 現在中国電力), ならびに本学学生 山本修君

の助力を得たことを記して敬意を表す。

文 献

- (1) 青柳・松岡, 機講論, No. 770-9(1977), 145.
- (2) Sakata, I., ほか4名, *SAE Paper*, No. 900658(1990).
- (3) Needham, J. R., *SAE Paper*, No. 891949(1989).
- (4) Kato, T., Tsujimura, T., Shitani, M., Minami, T. and Yamaguchi, I., *SAE Paper*, No. 890265(1989).
- (5) Shimada, T., Shoji, T. and Takeda, Y., *SAE Paper*, No. 891919(1989).
- (6) Yokota, H., Kamimoto, T., Kosaka, H. and Tsujimura, K., *SAE Paper*, No. 910225(1991).
- (7) 坂根・浜本・住本, 機論, 54-503, B(1988), 1861.
- (8) 山根・横田・神本, 機論, 58-550, B(1992), 1955.
- (9) 鈴木・西田・廣安, 機論, 59-563, B(1993), 2325.
- (10) 鈴木・西川・廣安, 機論, 59-558, B(1993), 329.
- (11) Soave, G., *Chem. Eng. Sci.*, 27(1972), 1197.
- (12) Redlich, O. and Kwong, J. N. S., *Chem., Rev.*, 44(1949), 233.
- (13) Senda, J., Fujimoto, H. and Yamamoto, K., *SAE Paper*, No. 912460(1991).
- (14) 桂・斉藤・千田・藤本, 機論, 56-521, B(1990), 227.
- (15) Hiroyasu, H., Nishida, K. and Min, J. C., *Proc. Int. Symp. COMODIA 90*, (1990), 205.
- (16) Senda, J., Fukami, Y., Tanabe, Y. and Fujimoto, H., *SAE Paper*, No. 920578(1992).