壁面に衝突するディーゼル噴霧の着火位置* (衝突壁面角度, 噴射圧力および燃料噴射量の影響)

川口 知宏^{*1}, 長瀧 翼^{*2}, 天谷 賢児^{*3}
古畑 朋彦^{*3}, 新井 雅隆^{*3}

Ignition Position of a Diesel Spray Impinging on a Wall (Effect of Wall Angle, Injection Pressure and Fuel Quantity)

Tomohiro KAWAGUCHI, Tsubasa NAGATAKI, Kenji AMAGAI,
Tomohiko FURUHATA and Masataka ARAI^{*4}

^{*4} Department of Mechanical System Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Ignition and combustion characteristics of diesel spray impinging on a wall were experimentally investigated. Ignition position and appearance position of the luminous flame kernel were stereoscopically observed using a two-way fiber optical system. Flat impingement wall was fixed in a high temperature, high pressure combustion chamber. Inclined angle of the flat wall was set at 30 degrees or normal against the center axis of the injection spray. Distance from nozzle tip to the impingement point on the wall was set at 50 mm. Effects of injection pressure and fuel quantity on ignition position were investigated. As the result, ignition positions were observed near the spray periphery. And the radial position of ignition was shifted to the larger radial position when the injection pressure increased. Luminous flame appeared near the wall surface in the both cases of 30 degrees and normal impingements. And the region of luminous flame appearance was not changed significantly with an increase of injection pressure.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Combustion, Ignition, Luminous Flame, Wall Impingement, Inclined Wall

1. 緒 論

近年コモンレール噴射システムの開発により, ディーゼル機関の性能は大幅に改善された。これは, 燃料を高圧噴射することで燃料の微粒化が促進され^①, 燃焼の改善がもたられたためと考えられる。しかし, 燃料を高圧噴射することで噴霧の予混合が進み, 一気に予混合的な燃焼が生じてしまうと NO_x が大量に生成してしまう可能性がある。そこで, 着火前に燃料と空気との混合を適切に制御することが重要であることが報告されている^{②③}。ディーゼル噴霧の着火前の混合過程を適切に制御することを考えた場合, 着火遅れについての研究が極めて重要である。この着火遅れについては, これまでに多くの研究が行われてきた^{④⑤}。一方, 着火遅れだけではなく着火位置もその後の燃焼特性に大きな影響を与えられられるため, 着火位置特性の把握が必要である。著者らは前報^⑥において, 壁面衝突噴霧の着火位置を詳細に調べ, 衝突

角度や着火遅れによって着火位置が大きく変化することを示した。しかしながら, 噴射圧力が着火位置に与える影響については, 十分にデータが得られていない。特に, 高圧噴射による壁面衝突噴霧については, 噴射圧力の違いが着火位置に大きく影響するものと考えられる。そこで, 本研究では壁面衝突ディーゼル噴霧の

Fig.1 Experimental apparatus

* 原稿受付 2005 年 9 月 21 日.

^{*1} 群馬大学大学院工学研究科 (☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1).

^{*2} 日産車体(株) (☎ 254-8610 平塚市天沼 10-1).

^{*3} 正員, 群馬大学工学部.

E-mail: arai@me.gunma-u.ac.jp

着火位置、および、最初にすすが火炎内で発生する輝炎発生位置に与える噴射圧力の影響を調べることとした。また、さまざまな噴射圧力の条件下において壁面衝突角度や燃料噴射量が着火位置に与える影響も明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。実験装置は大きく分けて、燃焼容器、コモンレール式高圧噴射装置および高速度ビデオカメラシステムの 3 つの部分から構成されている。燃焼容器は観察窓のついた圧力容器 (図 1 の①) とその下部に取り付けられた加熱部②からなる。圧力容器は大きさ $220\text{mm} \times 190\text{mm} \times 280\text{mm}$ の直方体でその内部に直径 $120\text{mm} \times$ 長さ 230mm の燃焼室を設けてある。燃焼容器内の空気加熱および加圧は、ポンペに貯めた圧縮空気を加熱部②の下部より注入し、ヒーターを通過する際に加熱された空気を燃焼容器内に充填することで行った。実験条件は雰囲気圧力を $P_a = 3.0\text{MPa}$ で一定とし、雰囲気温度 T_a を 693K から 803K の間で変化させた。燃焼室内雰囲気温度は、ノズル先端から噴射方向に 10mm 、噴射軸から半径方向に 10mm の位置にクロメル-アルメル熱電対を取り付けて計測した。

燃料噴射は、コモンレール式高圧噴射装置を用いて行った。噴射ノズルは単噴孔ノズルであり、噴孔径 0.17mm のものを使用した。また、噴射制御装置を用いて燃焼容器内に一回だけ噴射を行った。今回の実験における噴射条件を表 1 に示す。噴射圧力は $P_{inj} = 35, 90, 120, 150\text{MPa}$ と変化させた。その際、噴射期間を変えることで噴射量を $M_f = 7\text{mg}$ あるいは 20mg で一定にした。また、燃料は JIS2 号軽油を用いた。

図 2 にボッシュの長管法で測定した噴射率波形の例を示す。図の上段は噴射燃料量 20mg で噴射圧力の異なる条件を示した例で、下段は噴射圧力 90MPa における噴射量 7mg と 20mg の比較例である。いずれの噴射率波形も噴射開始直後から終了直前までの間、ほぼ一定の噴射率が得られていることがわかる。

高速度ビデオカメラシステムは高速度ビデオカメラ (4500frame/s) (図 1 の⑫) に二方向撮影用の光ファイバー光学系⑦⑧⑨を取り付けたものである。これにより 90 度異なる二方向からの像を光ファイバーで転送し、高速度ビデオカメラの同一画面上に同時撮影することが可能である。得られた画像をもとに、着火位置を三次元的に特定することができる。着火は、噴霧内で急激な発熱反応が生じ始めた瞬間と考えることができるが、ここでは OH ラジカルが最初

Table1 Experimental conditions

Injection pressure [MPa]	Injection quantity [mg/st]	Wall angle [deg.]
35	20	0, -30
90	7	0, -30
90	20	0, -30
120	7	0, -30
120	20	0, -30
150	20	-30

Fig.2 Injection rate curves

Fig.3 Definition of coordinates and symbols

に現れた時点を着火と判断した⁽²⁾⁽⁵⁾。OH ラジカルの発光の検出には OH フィルター⑩を用い、その発光強度が微弱であるために、イメージインテンシファイア⑪を用いて増感した。OH フィルターを用いる

場合、像が暗くなり着火前の噴霧の様子をとらえることが出来ない。そこで、キセノンランプ⑥を用いて噴射ノズルの出口付近を照らし、噴霧の様子が観察できるようにして噴射開始および噴射終了時刻を求めた。

今回の実験では、OH 発光以外に輝炎の発生点も観測した。輝炎の発生点は、着火後に火炎が広がり最初にすす粒子が形成された位置を表しているものと考えられる。この輝炎の発生位置の検出には OH フィルターとイメージインテンシファイアを用いずに、通常のレンズシステムを用いた。前報⁽⁴⁾と同様に以下では、噴射を開始して OH 発光が最初に観測された位置を着火位置と呼び、輝炎が最初に観測された位置を輝炎発生位置と呼ぶ。

本研究で用いた座標とパラメータの定義を図 3 に示す。実験データの整理を容易にするために、ふたつの直交座標系を採用することにした。いずれの場合も座標の原点 O は、噴射軸と壁面の交点とした。ひとつの座標系は、 z 軸を噴射軸と一致させた座標系で、これを $O\text{-}xyz$ とした。もうひとつは、 x , y 軸を壁面上に取った座標系で $O\text{-}x'y'z'$ とした。壁面を傾ける方向は、 y (y') 軸を回転軸として x' 軸方向が傾くものとし、 x 軸から計った x 軸と x' 軸の間のなす角を θ_w とした。今回の実験では、噴射軸に垂直な壁面 ($\theta_w = 0^\circ$) から -30° 傾けた壁面 ($\theta_w = -30^\circ$) を用いて実験を行うことにした。またノズル先端から原点 O までの距離 L_w は、いずれの場合も 50mm とした。

高速度ビデオカメラから得られる画像より、噴射軸を基準とした座標系 $O\text{-}xyz$ での着火位置 (X, Y, Z) を求めた。なお、燃料が噴射されてから火炎が発生するまでの着火遅れ時間を τ_{ig} とした。

3. 実験結果および考察

3・1 壁面衝突噴霧の成長特性 着火位置と噴霧形状との関連を明確にするために、非蒸発噴霧によって壁面衝突噴霧の成長特性を調べた。噴霧の蒸発および着火が生じないようにするために、常温 (293K) の空気による加圧雰囲気とした。ここでは実験条件との対応を考え、高温 (773K) の空気の密度と同一にするため、雰囲気圧力を 1.1MPa に設定して実験を行った。

図 4 は、噴霧の到達距離を示している。図中の L_r および L_z は、それぞれ噴霧の横方向および噴射方向到達距離である⁽⁴⁾⁽⁷⁾。噴射圧力が高压になるほど噴射方向および横方向への噴霧の成長が早いことがわ

Fig.4 Penetration curves of the sprays

Fig.5 Effect of ambient temperature on ignition delay ($\theta_w = 0^\circ$)

Fig.6 Effect of ambient temperature on ignition delay ($\theta_w = -30^\circ$)

Fig.7 Ignition positions and appearance position of luminous flame projected on x - z and x - y planes when the injection pressure was 35MPa

かる。特に、衝突後の噴霧の横方向への拡がり方は噴射圧力に大きく影響され、噴射圧力が高いほど同時刻における L_r が大きくなることわかる。

3・2 着火遅れ 雰囲気温度と着火遅れの関係を噴射圧力を変えて調べた。噴射軸に垂直な壁面 ($\theta_w = 0^\circ$) の場合を図5に、 -30° 傾けた壁面 ($\theta_w = -30^\circ$) の場合を図6にそれぞれアレニウス表示で示した。分布にばらつきがあるため、最小二乗法により線を引いた。噴射圧力の着火遅れ時間に対する大きな影響は現れていない。この理由としては、着火遅れは主に噴霧が受ける熱的な履歴に影響され、噴射圧力によって混合気形成状態に大きな差があっても、着火可能条件に達するまでの時間に大きな変化が生じなかったものと考えられる。

また、衝突壁面 $\theta_w = 0^\circ$ と $\theta_w = -30^\circ$ を比較すると、顕著な違いは現れていないと考えられる。

3・3 垂直衝突の場合の着火位置と輝炎発生位置

壁面角度 $\theta_w = 0^\circ$ の場合の着火位置と輝炎発生位置を測定し、両者を比較した。着火位置は○印、輝炎発生位置は●印で示してある。噴射圧力が低圧 ($P_{inj} = 35\text{MPa}$) の場合の結果を図7に示す。この図は、雰囲気温度が 703K から 783K までの範囲で見られたすべての着火位置と輝炎発生位置をまとめたものであ

Fig.8 Ignition positions and appearance position of luminous flame projected on x - z and x - y planes when the injection pressure was 120MPa

る。この図中の上の図は壁面の真横方向 ($-y$ 方向) から、下の図は噴射軸方向 (z 方向) から観察したものである。また、噴霧のどの部分で着火もしくは輝炎が発生したかを比較できるように、燃料噴射後時間 $t = 2.0\text{ms}$ における非蒸発噴霧の形状を示した。

Mohammadi ら¹⁷⁾が行った常温高圧雰囲気中での実験において、周囲気体は噴射圧力にあまり影響されず主に壁面衝突部付近で噴霧内に導入されることが示されている。本実験の場合、壁面に衝突した噴霧の外縁部分で主に着火が生じているが、中心部で着火する場合もある。また、これは図7に示すように衝突点から様々な半径方向の位置で見られている。これは、衝突点付近で空気が導入され、噴霧外縁の広い範囲において着火可能な状態が形成されたものと考えられる。

一方、輝炎発生位置は噴射軸近傍の図7下図において実線で囲まれた壁面近くで現れていた。これは、周囲空気が壁面衝突部付近で噴霧内に導入されるものの、燃料蒸気濃度が高い部分が衝突点の壁近傍には存在し、すす粒子が発生してしまうためである。次に、噴射圧力が高圧 ($P_{inj} = 120\text{MPa}$) の場合の結果を図8に示す。同図中には燃料噴射後時間 $t = 2.0\text{ms}$ における非蒸発噴霧の形状も示してある。図7と

比較すると衝突点からある程度離れて、実線で囲まれた輝炎発生領域の外側にドーナツ状に着火が見られた。これは、噴射圧力が高いことから噴霧の半径方向の成長速度が大きく、着火可能な噴霧が衝突点から離れた位置に形成されることを示している。ただし、図4より燃料噴射後時間 $t = 3.0\text{ms}$ での噴霧の横方向の到達距離は $L_r = 45\text{mm}$ 程度となるが、着火位置の噴射軸からの半径方向距離は最大でも $R_{ig} = 35\text{mm}$ 以内にとどまっている。これは、噴霧が半径方向に大きく成長するため、噴霧の先端付近の燃料が希薄となり着火が生じないものと考えられる。なお、前報で示したとおり着火遅れ時間は雰囲気温度に強く影響され、雰囲気温度が低い場合には着火遅れ時間がのびて、着火位置が衝突点から離れる傾向にある⁽¹⁾。

また、輝炎発生位置については図7の結果と同様に噴射軸近傍で現れた。これは、噴射圧力が低圧の場合と高圧の場合ともに、この部分に燃料濃度の濃い領域が存在していることを示している。この結果の重要な点は $r > 15\text{mm}$ の領域では輝炎発生が見られない点である。すなわち $r > 15\text{mm}$ の領域で着火が生じて、輝炎は $r < 15\text{mm}$ の領域でのみ見られることから、この時点における $r > 15\text{mm}$ の壁面近くの蒸発噴霧内部では、燃料濃度が淡くすす粒子が形成されない程度に空気との混合が進んでいるものと考えられる。

3・4 壁面を傾けた場合の着火位置と輝炎発生位置

壁面角度 $\theta_w = -30^\circ$ の場合で着火位置と輝炎発生位置に与える噴射圧力の影響を調べた。その結果を図9に示す。上の図は壁面の真横方向 (y 方向) から、下の図は噴射軸方向 (z 方向) からそれぞれ観察したものである。噴射圧力 $P_{inj} = 35\text{MPa}$ の場合、着火位置 (図中の破線で示す領域) は壁面下流側に広く分布しているが、 $P_{inj} = 90\text{MPa}$ 、 $P_{inj} = 120\text{MPa}$ と高圧になるほど噴射軸より離れた位置で観測されるようになった。いずれも壁面下流側 (x' 方向) の噴霧先端部付近で着火が見られた。このように、 $\theta_w = -30^\circ$ の場合においても着火位置は噴射圧力の影響を顕著に受けることが確認できた。

これに対して輝炎発生位置 (図中の実線で示す領域) は、いずれの噴射圧力の場合も噴射軸近傍で現れていた。これは、壁面角度 $\theta_w = 0^\circ$ の場合と同様であり、壁面衝突部の近くのみ燃料濃度の濃い領域が存在していることを示している。

3・5 着火位置と輝炎発生位置に与える噴射量の影響

壁面角度 $\theta_w = 0^\circ$ で噴射圧力 $P_{inj} = 90\text{MPa}$ にお

Fig.9 Effect of injection pressure on the ignition position and appearance position of luminous flame ($\theta_w = -30^\circ$)

Fig.10 Effect of injection quantity on the ignition position and appearance position of luminous flame ($\theta_w = 0^\circ$)

る着火位置と輝炎発生位置を求め、噴射量 M_f の影響を調べた。その結果を図 10 に示す。図は壁面真横（ $-y$ 方向）から観察したものである。噴射量を $M_f = 20\text{mg}$ から 7mg に変えた場合、どちらの条件でも着火位置は衝突噴霧の外縁で発生し、輝炎発生位置は噴射軸近傍で現れた。したがって、壁面角度 $\theta_w = 0^\circ$ の場合には、着火位置と輝炎発生位置は噴射量の影響を受けていないことがわかる。

同様に、壁面角度 $\theta_w = -30^\circ$ の場合における着火位置と輝炎発生位置に与える噴射量の影響を調べた。その結果を図 11 に示す。着火位置は噴射量によらず壁面下流側（ x' 方向）の噴霧先端付近で観察された。これに対して、輝炎は噴射量 $M_f = 20\text{mg}$ の場合は噴射軸近傍で発生し、噴射量 $M_f = 7\text{mg}$ の場合は噴射軸から離れた位置で発生した。この理由としては、噴射量 $M_f = 7\text{mg}$ の場合は、噴射時間が短く（約 1ms ）燃料濃度の濃い領域が衝突点付近に形成されず、噴射された燃料のうち濃度の高い部分が壁面下流側（ x' 方向）に流れてゆき、その部分から輝炎が発生していると判断できる。すなわち着火直後において、壁面下流で壁から若干離れた位置での燃料濃度が衝突点の濃度より高いと推察される。

4. 結論

垂直および傾いた壁面への衝突噴霧の着火位置と輝炎発生位置を観察した結果、以下の結論を得た。

- (1) 噴霧の衝突角度が 0° と -30° の場合それぞれについて、噴射圧力が $P_{inj} = 35\text{MPa}$ から 120MPa の範囲で変化しても着火遅れ時間には顕著な差が現れなかった。
- (2) 壁面角度 $\theta_w = 0^\circ$ の場合、噴射圧力が低圧（ $P_{inj} = 35\text{MPa}$ ）の条件では壁面に衝突後の噴霧外縁部の広い範囲で着火が見られた。一方高圧（ $P_{inj} = 120\text{MPa}$ ）の条件では衝突点からある程度離れた噴霧先端付近で着火が生じる。また、輝炎発生位置は噴射圧力に関係なく、噴射軸近傍の壁面付近で観察された。
- (3) 壁面角度 $\theta_w = -30^\circ$ の場合、着火位置は噴射圧力を高くするほど噴射軸より離れた壁面下流位置で現れるようになった。
- (4) 壁面角度 $\theta_w = -30^\circ$ において、輝炎発生位置は噴射量 $M_f = 20\text{mg}$ の場合は噴射軸近傍で発生するが、噴射量が $M_f = 7\text{mg}$ の場合は下流側に離れた位置で観察された。

Fig.11 Effect of injection quantity on the ignition position and appearance position of luminous flame ($\theta_w = -30^\circ$)

参考文献

- (1) Nomura, S. et al., *Proceedings of the 13th Annual Conference on ILASS-JAPAN2004*, (2004), pp.61-66.
- (2) Lopez, J. J. and Pickett, L. M., *Proceedings of COMODIA-2004* (2004), pp.387-394.
- (3) Lopez, J. J. and Pickett, L. M., *SAE paper No.2005-01-0921* (2005), pp.75-89.
- (4) Hasegawa, R. et al., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.34, (2003), pp.47-52.
- (5) Crua, C. et al., *International Journal of Engine Research*, Vol.5, No.4, (2004), pp.365-374.
- (6) Ishiyama, T. et al., *Proceedings of COMODIA-90*, (1990), pp.565-570.
- (7) Kwon, S. I. et al., *Bulletin of the MESJ*, Vol.18 (1990), pp.3-15.
- (8) Kosaka, H. et al., *Proceedings of COMODIA-98*, (1998), pp.387-392.
- (9) Amagai, K. et al., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.20, (1999), pp.407-411.
- (10) Kobayashi, S. et al., *International Journal of Engine Research*, Vol.1, No.1, (2000), pp.29-39.
- (11) Arai, M. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.702, (2005), pp.363-369.
- (12) Wakisaka, Y. et al., *Proceedings of COMODIA-98*, (1998), pp.441-446.
- (13) Hashimoto, S. et al., *Proceedings of COMODIA-98*, (1998), pp.405-410.
- (14) Kouno, M. et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.665 (2002), pp.276-283.
- (15) Arai, M. et al., *SAE paper No.2003-01-1787*, (2003).
- (16) Ebara, T. et al., *SAE paper No. 970046*, (1997), pp.27-36.
- (17) Mohammadi, A. et al., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.33, No.4, (2002), pp.109-114.