

衝突噴霧の挙動*

(第1報, 壁面噴流としての挙動と内部構造)

江原拓未*¹, 新井雅隆*²

Behavior of Impingement Spray

(1st Report, Wall jet Behavior and Internal Structure of Spray)

Takumi EBARA and Masataka ARAI

In this paper, behavior of a diesel spray impinging on an inclined wall was experimentally investigated in a pressurized vessel. In order to clarify the wall effect on a diesel spray structure, a relative angle of the inclined wall to the spray axis was varied. Spray penetration along the wall was observed optically and compared with that of a free spray. To observe an internal structure of the spray, it was visualized by a YAG laser sheet light and its tomographic image was captured on a film. The photo-image on a film was taken into an image analyzing computer using a high resolved image scanner. High density ridges in the tomographic image were extracted to clarify the internal structure of an impingement spray. Further, the growth characteristics of impingement spray was observed by a high speed photograph. To evaluate various spray motion quantitatively, a spray path penetration which described a development of a spray tip along the wall was used. As the result, the slip flow region of spray was found near the impingement point on the wall. It seemed that the injected fuel does not make a mixture and slipped on the wall surface in this slip region. The length of this region was measured in various impingement wall condition.

Key Words: Diesel Engine, Internal Combustion Engine, Jet, Diesel Spray, Wall Jet

1. ま え が き

直接噴射式ディーゼル機関における燃料噴霧の形成過程に関しては、これが燃焼状態や排出ガス特性に大きな影響を与えるためこれまで多くの研究がなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。また、小形機関の場合には、燃焼室の小容積化に伴い、壁面の干渉をさまざまな形で受ける噴霧の形成過程に関する研究が重要になってきた。壁面に衝突する噴霧の成長に関しては壁面衝突時の燃料液滴の壁面への付着やその後の広がりについての研究が最近なされている⁽³⁾⁽⁴⁾。著者らはこれまで、壁面の干渉を受けるディーゼル噴霧について実験的な研究を行い、壁面干渉噴霧の成長方向や成長速度の変化について調べてきた⁽⁵⁾。さらに、壁面との衝突によりさまざまに変形する噴霧の成長を統一的に評価できる噴霧軌跡長さを提案してきた⁽⁶⁾。本研究では、壁面衝突噴霧の成長挙動に及ぼす衝突距離や衝突角度の影響を調べた。さらに、衝突噴霧の断面写真を画像解析することで、壁面衝突噴霧の内部構造を調べた。特に、衝突点近傍の噴霧構造に注目し、衝突直後に層状の流れがあ

ることを確認し、その挙動を明らかにした。

2. 実験装置と壁面衝突噴霧の評価手法

噴霧流動の経過を観察する装置の概略を図1に示す。噴霧の成長を観察するためにアクリル窓を有する圧力容器を用いた。容器内は窒素ガスを用いて加圧し、ディーゼル機関の燃焼室内空気密度を模擬した。容器の空気密度は 20 kg/m^3 とした。このとき容器内圧力は常温で 1.5 MPa である。噴射ノズルは、開弁圧 19.3 MPa 、噴孔長さ $L=0.6 \text{ mm}$ 、噴孔径 $D=0.24 \text{ mm}$ で、単孔のものを用いた。燃料配管系に電磁バルブを組み込みシーケンサで制御することで1回噴射を行った。その際、ダミーノズルを用いて配管内の背圧を約 3 MPa に保った。1回の噴射あたりの噴射量は 29.7 mg 、噴射期間は約 4 ms とした。供試燃料にはJIS2号軽油を用いた。衝突板には鋼板を用い、そのなめらかな表面を衝突壁面とした。これを微動装置を介して圧力容器内に固定し、ノズルからの距離と衝突角度を調節した。噴霧の成長挙動を調べるために、ストロボを用いて透過光による噴霧像をドラムカメラで撮影した。せん光時間は 75 ns 、撮影間隔は 0.2 ms である。

噴霧の内部構造を観察する実験の光学系を図2に示

* 原稿受付 1997年10月23日。

*¹ 正員, 群馬大学大学院(☎ 376-8515 桐生市天神町1-5-1)。*² 正員, 群馬大学工学部。

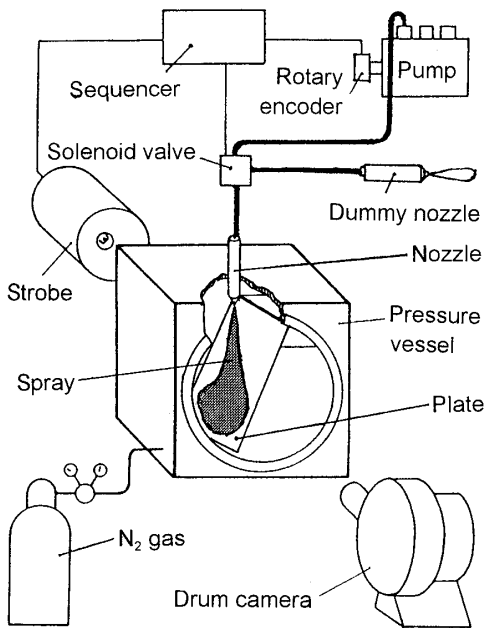


Fig. 1 Experimental apparatus to obtain a spray growth characteristics

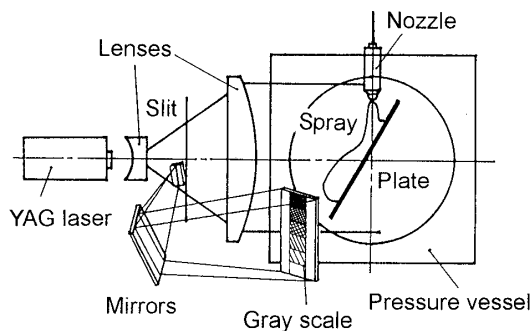


Fig. 2 Experimental apparatus to obtain an internal spray structure

す。YAGレーザを光源としたシート光を用いて噴霧軸を含む噴霧断面を可視化した。断面像は35mmカメラで撮影し、コンピュータで画像処理した。このとき、レーザ光強度の変化や写真現像時のむらによる画像濃度の変化を補正するために、レーザ光の一部をグレースケールに当てそれを同時に写し込むことによって画像処理のしきい値が一定になるようにした。具体的な画像処理手法については後述する。

噴射ノズルと壁面の位置関係を図3に示す。ノズル先端を原点として噴射軸方向にx軸、x軸と垂直に壁面と反対方向にy軸をとった。設定パラメータは壁面が噴射軸となす角度φおよびx軸上の壁面とノズル先端との距離L_wである。また、x軸と壁面との交点を衝突点と定義した。今回の実験ではφを4~90°、L_wを10~70mmの範囲で変えた。

壁面に衝突して変形する噴霧の成長挙動をさまざま

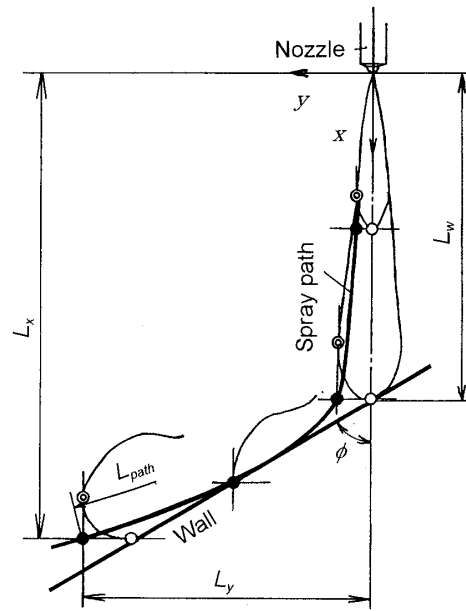


Fig. 3 Definition of impingement spray path penetration

な壁面条件の場合について統一的に評価するために、著者らはこれまで噴霧軌跡長さを提案してきた⁽⁶⁾。噴霧軌跡長さの定義の概略も図3に示す。ここで、噴霧軌跡はx軸方向の先端位置(図3中○で示す)のx座標およびy軸方向の先端位置(図3中●で示す)のy座標を合成して得られた仮想的な噴霧先端(図3中●で示す)の軌跡を表す。微小時間dtにおける仮想的な噴霧先端の変位は以下の式で表される。

$$dL_{path} = \sqrt{(dL_x)^2 + (dL_y)^2} \dots\dots\dots (1)$$

噴霧軌跡長さはこの仮想噴霧先端の変位を以下のように時間について積分することで得られる。

$$L_{path} = \int_0^{t_{inj}} \sqrt{\left(\frac{dL_x}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dL_y}{dt}\right)^2} dt \dots\dots\dots (2)$$

これにより壁面衝突噴霧において、壁面衝突前後の噴霧成長挙動を連続した一つのパラメータで統一的に評価することができる。この方法を自由噴霧について適用した結果と従来の噴霧先端到達距離の比較を噴射率とともに図4に示す。L_{path}はL_xに比例して増加してゆき、噴射終了の時点(噴射開始からの時間t_{inj}=4.5ms)でその差は約10%であった。したがって、この評価法は実際の噴霧先端を表すものではないが、自由噴霧の成長挙動を噴霧先端到達距離と同じように表現できるものと考えられる。

3. 実験結果の解析および考察

3.1 壁面衝突噴霧の成長挙動

壁面の衝突角度をさまざまに変えたときのL_{path}の変化を両対数グラフに整理したものを図5に示す。自由噴霧のL_{path}は

噴射開始後しばらくは噴射開始からの時間に比例し、その後は時間の1/2乗に比例することを示す2本の直線で表される。このとき、傾きの変化する点は分裂完了点に対応し、その点までの距離は噴霧の分裂長さとして定義されている。これは著者の一人が以前に行った自由噴霧の分裂長さにする研究結果⁽⁷⁾と一致する。図5より、今回の自由噴霧の分裂長さ L_b は約25 mmであった。衝突距離 L_w は30 mmであり、この条件では噴霧は分裂完了直後に壁面と衝突する。衝突角度 30° では衝突後の L_{path} は分裂完了後の自由噴霧と同様に、噴霧開始からの時間の1/2乗に比例する。衝突角度が大きくなると L_{path} の成長速度は小さくなり、衝突後の L_{path} の傾きは1/2よりも小さくなる。特に、 $\phi=90^\circ$ の場合の噴霧ではその傾きは約1/4であった。また、衝突角度が小さい場合 ($\phi=4^\circ$) は衝突後しばらくの間(約0.5 ms)成長距離が自由噴霧と変わ

らず、 $t_{inj}=2$ ms以降は自由噴霧よりも若干 L_{path} が大きくなる。

3.2 壁面衝突後の噴霧の成長挙動 壁面衝突後の成長挙動の変化から、衝突の前後では噴霧の性質は大きく異なるものと考えられる。そこで、壁面衝突後の噴霧の断面をレーザーシートで可視化して撮影した。衝突角度を種々に変えた場合の噴霧流動の変化を図6に示す。噴射開始からの時間はいずれも1.5 ms、衝突距離は30 mmである。衝突角度が小さい場合 ($\phi=10^\circ$) では、衝突した噴霧が壁面に沿った平行な外縁を形成している領域がある。この領域では反壁面方向に噴霧が拡散することがなく、周囲気流との運動量交換が少ないものと見られ、流れはおもに壁面と平行に生じているものと考えられる。またここでは、反壁面側

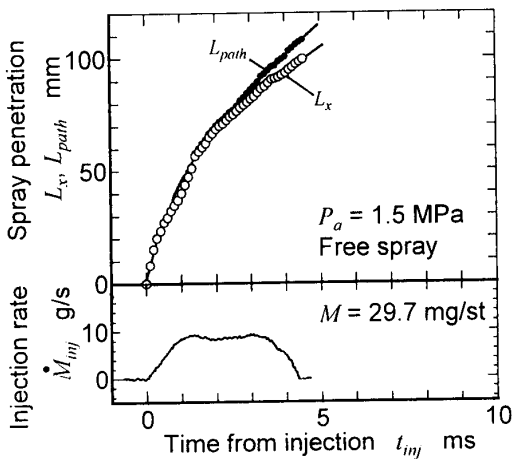


Fig. 4 Spray penetrations

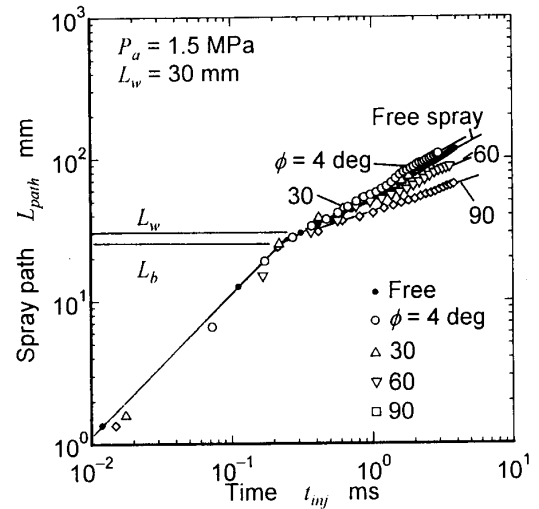


Fig. 5 Spray path penetration of impingement spray

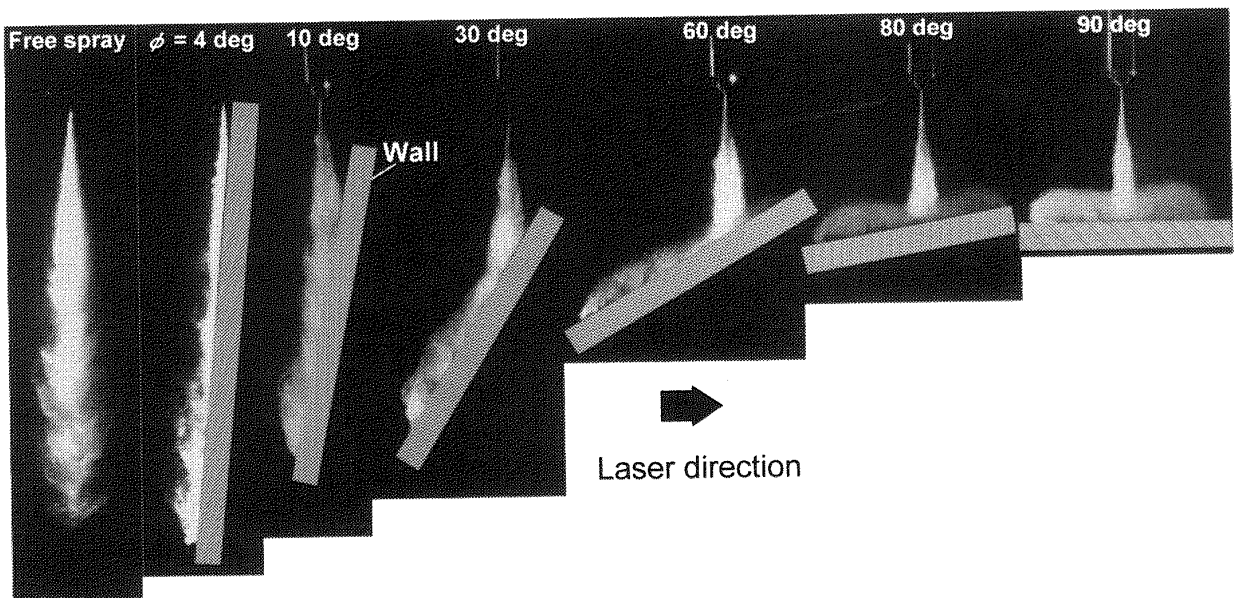


Fig. 6 Structure of impingement spray

の噴霧外縁は凹凸の少ない形状をしている。衝突角度が大きくなると、噴霧は壁面に衝突した後上流側にも広がるようになる。特に、壁面に垂直に衝突する場合は噴霧が衝突点から放射状に広がっている。このような噴霧では、噴霧の成長挙動は放射状噴流⁽⁶⁾と同様な性質を示すと考えられた。そこで、放射状噴流と同様に衝突点に仮想原点を設定し、時間および成長距離をこの仮想原点を起点として整理することで衝突後の噴霧成長挙動についての解析を行った。

壁面衝突後の成長挙動を衝突前の挙動と分離するために設定した壁面衝突噴霧の仮想原点を図7に示す。噴霧軌跡長さ L_{path} および噴射開始からの時間 t_{inj} からノズルと壁面との間の距離 L_w および衝突までの時間 t_w をそれぞれ差引くことで、衝突後の噴霧軌跡長さ \tilde{L}_{path} と衝突からの時間 \tilde{t}_{inj} を以下のように定義した。

$$\tilde{L}_{path} = L_{path} - L_w \dots\dots\dots (3)$$

$$\tilde{t}_{inj} = t_{inj} - t_w \dots\dots\dots (4)$$

仮想原点は噴霧軸と壁面との交点に設置され、破線以降の噴霧軌跡は衝突後の成長挙動を表している。

衝突壁面の角度を変化させた場合の衝突後の噴霧軌跡長さ \tilde{L}_{path} を図8に示す。衝突距離 L_w は10 mmで、これは噴霧の分裂長さ ($L_b \approx 25$ mm) よりも短く、未分裂の液柱部分が直接壁面に衝突する場合である。壁面衝突噴霧の \tilde{L}_{path} は衝突壁面角度 ϕ が大きくなると小さくなる。また、衝突直後の領域を除いて \tilde{L}_{path} はいずれの場合も衝突からの時間 \tilde{t}_{inj} の1/2乗に比例している。これは、仮想原点を用いて整理した放射状噴流についての研究結果と一致している⁽⁶⁾。すなわち、壁面衝突点を仮想原点として整理した噴霧成長挙動については、自由噴霧あるいは放射状噴流と同様に

経過時間 \tilde{t}_{inj} の1/2乗に比例する。

衝突距離を噴霧の分裂長さよりも大きな $L_w = 60$ mm に固定し、衝突角度を種々に変化させた場合の衝突後の噴霧軌跡長さの変化を図9に示す。図8と同様、衝突後ある程度時間が経過した後は衝突点からの成長距離は衝突からの経過時間 \tilde{t}_{inj} の1/2乗に比例している。しかしながら、図8と同様、壁面衝突直後には \tilde{t}_{inj} の1/2乗には比例しない領域がある。そこで、この領域の噴霧流動状態を詳細に調べるために、著者らが以前より提案している画像処理法⁽⁶⁾を適用した。

3.3 壁面衝突噴霧の内部構造の観察 壁面衝突直後を中心に、壁面に衝突する噴霧構造から高濃度領域を抽出する画像処理を行った⁽⁶⁾。処理の過程を図

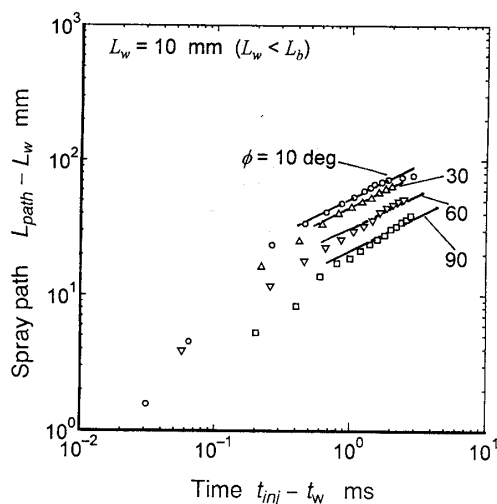


Fig. 8 Growth characteristics of post impingement spray ($L_w = 10$ mm)

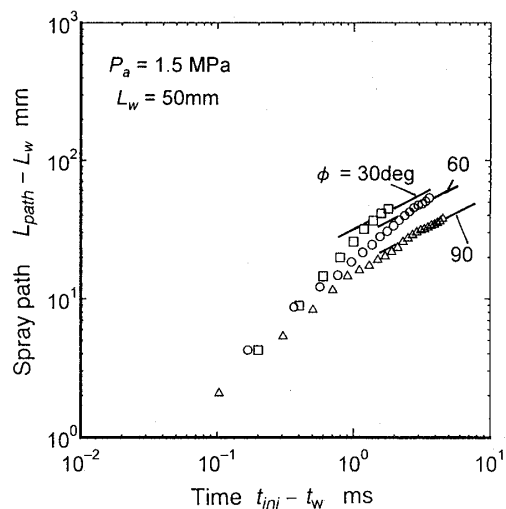


Fig. 9 Growth characteristics of post impingement spray ($L_w = 50$ mm)

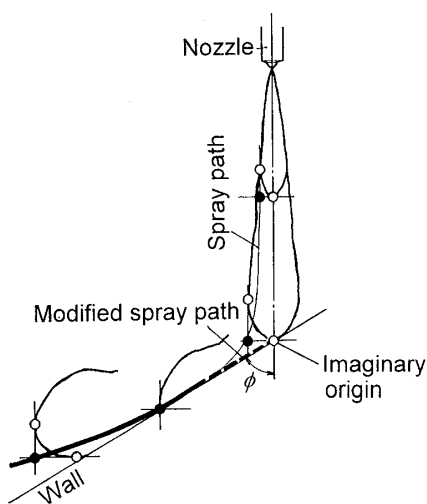


Fig. 7 Imaginary origin of post impingement spray

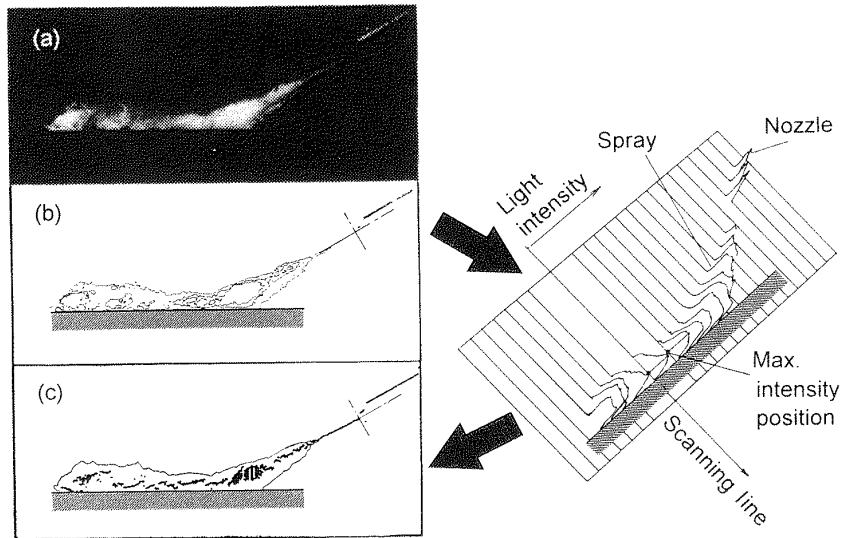
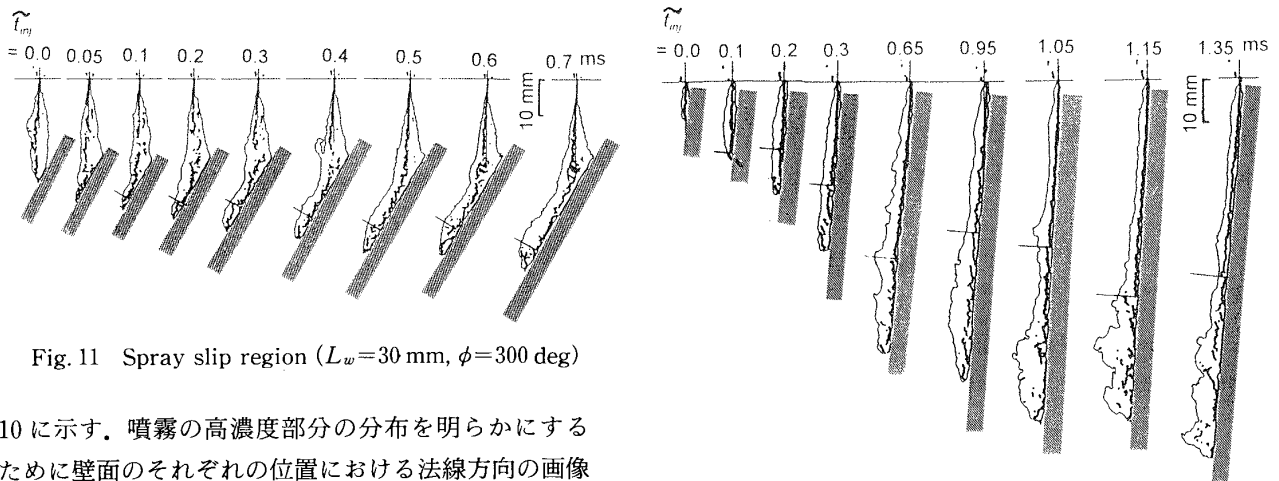


Fig. 10 Image analysis to obtain an internal spray structure

Fig. 11 Spray slip region ($L_w=30$ mm, $\phi=300$ deg)

10に示す。噴霧の高濃度部分の分布を明らかにするために壁面のそれぞれの位置における法線方向の画像濃度分布の最大値の位置を求める処理を行った。この処理手法を図10中右側に示すが詳細は以前に報告しているので省略する。これら最高濃度点の列は噴霧内の濃度分布におけるりょう線に相当する。図10中斜線部は壁面を示し、ノズル先端を示すために補助線を追加してある。また、図10(c)中の実線は噴霧外縁を示す。噴霧外縁はグレースケールを基準にした画像処理をもとに、実際の噴霧外縁とほぼ一致するような画像濃度の等濃度線で定義した。

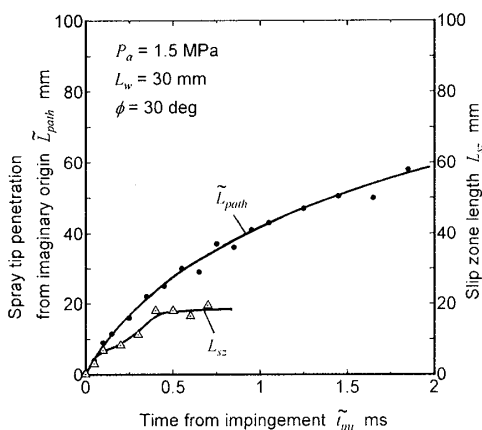
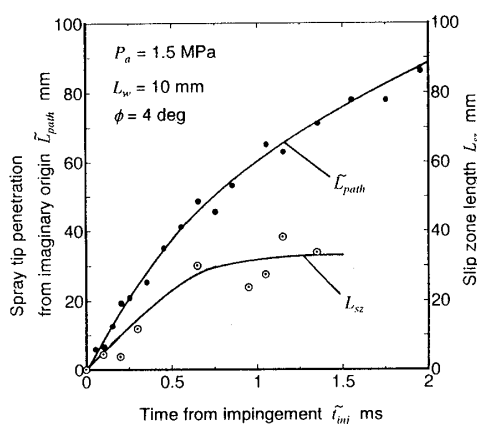
壁面に衝突する噴霧の内部構造の時間変化を、壁面衝突前後を中心に整理した結果を図11に示す。衝突角度 ϕ は 30° 、衝突距離 L_w は30 mmである。衝突直後($\tilde{t}_{inj}=0.05$ ms)の噴霧では、先端付近に高濃度の層状の領域が存在している。この領域では燃料の一部は壁面に付着して液膜を形成していると考えられる。衝突後0.1 msの時点では、噴霧の先端部分が壁面から離れているが、衝突付近には依然として層状の領域が存在している。したがって、この領域での噴霧は反壁面方向に広がらず、厚さが一定の形状をしている。

Fig. 12 Spray slip region ($L_w=10$ mm, $\phi=4$ deg)

ここでは燃料液滴と周囲空気との運動量交換が進んでいないと考えられる。そこで、この領域を噴射された燃料が壁面上を滑走するスリップ領域と定義した。図11においては、高濃度噴霧を表す最高濃度点がノズルからほぼ切れ目なく直線的に並んでいる部分をスリップ領域と定義した。その先端を示す直線を図11中に示した。衝突点からスリップ領域先端までをスリップ領域長さ L_{sz} と定義し、この長さの変化を調べることにした。

分裂完了以前に浅い角度で壁面に衝突する噴霧の内部構造の時間変化を図12に示す。図11と同様、衝突点から噴霧先端方向へ層状流動領域が存在していて、ここでもスリップ領域長さ L_{sz} を測定することができる。

壁面衝突点直後に存在するスリップ領域の長さの時間変化を図13に示す。衝突角度は 30° 、衝突距離は30 mmである。衝突噴霧の噴霧先端を表す衝突後の

Fig. 13 Definition of spray slip length ($\phi=30$ deg)Fig. 14 Definition of spray slip length ($\phi=4$ deg)

噴霧軌跡長さも合わせて示す。スリップ領域長さ L_{sz} は壁面衝突後しばらくは噴霧全体の長さと同じく、衝突点以降の噴霧全体がスリップ状態にある。その後、 L_{sz} は衝突からの経過時間に伴って増加するが、衝突後ある時間経過したところで一定値をとっている。

噴射開始直後に非常に浅い角度で壁面に衝突する噴霧 ($L_w=10$ mm, $\phi=4^\circ$) のスリップ部領域長さの時間変化を図 14 に示す。この場合もスリップ領域の長さは衝突後しばらく時間が経過した後で一定値をとる。そこで、一定値となったスリップ領域の長さを単にスリップ長さ L_{slip} と定義し、壁面条件によって変化する値として整理した。

壁面衝突噴霧のスリップ長さを衝突距離について整理した結果を図 15 に示す。壁面に非常に浅い角度で衝突する $\phi=4^\circ$ では、衝突距離の増加に伴って噴霧のスリップ長さは大幅に短くなっている。衝突距離が 30 mm より大きな場合には、衝突距離が 30 mm より短いときと比較して噴射ごとのスリップ長さの変動が大きくなった。垂直衝突噴霧 ($\phi=90^\circ$) では衝突距離の違いによるスリップ長さの変化は小さく、その値は浅い角度の衝突のときと比べて短い。衝突角度の大き

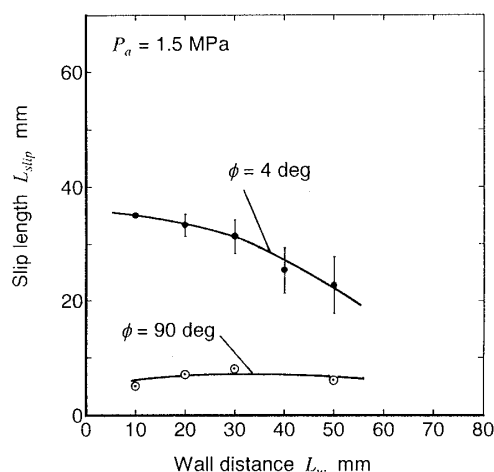


Fig. 15 Variation of spray slip length against wall distance

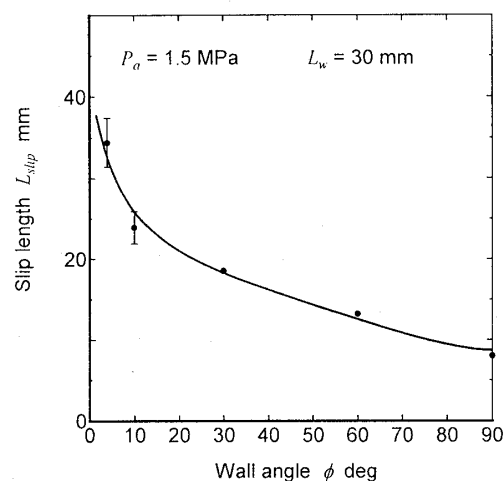


Fig. 16 Variation of spray slip length against wall angle

な噴霧では、衝突時に未分裂の燃料が存在している場合でも衝突により分裂過程が終了するため、その後のスリップ領域が短くなったものと考えられた。

壁面衝突噴霧のスリップ長さを衝突角度について整理した結果を図 16 に示す。衝突角度の増加に伴って噴霧のスリップ長さは小さくなり、これは壁面角度の変化による壁面衝突直後の噴霧成長挙動の大きな変化に対応している。したがって、壁面衝突噴霧の成長挙動を評価するためには、スリップ長さを評価することが重要であると思われる。

4. ま と め

壁面に衝突するディーゼル噴霧の成長挙動を明らかにするために、噴霧軌跡長さを用いて壁面衝突噴霧の成長過程を整理した。また、壁面衝突直後を中心に噴霧の内部構造を観察した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 壁面衝突噴霧の仮想的な噴霧先端の挙動を表

す噴霧軌跡長さを用いて,さまざまな距離や角度で壁面に衝突するディーゼル噴霧の成長挙動を統一的に評価できた。

(2) 壁面衝突点に時間と距離についての仮想原点を設定すると,壁面衝突噴霧の成長挙動は自由噴霧や放射状噴流と同様に時間の1/2乗で整理できることがわかった。

(3) 壁面衝突点付近のスリップ領域の存在を明らかにし,その領域の長さの壁面条件への依存性を明らかにした。壁面衝突噴霧の成長特性を評価するためには,本論文中で示されたスリップ長さを測定することが必要であり,それが壁面衝突噴霧の大きな特徴であることがわかった。

本研究の遂行にあたっては,本学 天谷賢児助教授より多くのご助言をいただいた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 廣安博之・ほか4名,機論,48-431, B(1982), 1402-1409.
- (2) Kamimoto, T., *Proc. COMODIA 94*, (1994), 33-41.
- (3) Eckhause, J., E. and Reitz, R., D., *Atomiz. Sprays*, 5 (1995), 213-242.
- (4) Senda, J., ほか3名, *SAE Paper*, No. 941894 (1994).
- (5) 江原拓未・ほか2名,機論,62-595, B(1996), 1253-1259.
- (6) Ebara, T., ほか2名, *SAE Paper*, No. 970046 (1997).
- (7) Arai, M., ほか3名, *SAE Paper*, No. 840275 (1984).
- (8) Rajaratnam, N. (野村安正訳),噴流, (1981), 223-244, 森北出版, 東京.