

壁面に沿って成長するディーゼル噴霧の挙動*

江原拓未*¹, 天谷賢児*², 新井雅隆*²

Behavior of Diesel Spray Penetrating along a Wall

Takumi EBARA, Kenji AMAGAI and Masataka ARAI

In this paper, behaviors of diesel spray injected along a wall were experimentally investigated. In order to clarify the wall effect on spray structure, the geometry of the wall and its relative position to the spray axis were varied. Structures of spray injected into a high pressure atmosphere were recorded by high speed photographs. Results shows that the asymmetrically large vortexes in the spray were induced by the wall effect, and the spray penetrating along the wall was deviated to the wall surface. This phenomenon is called the Coanda effect in the field of fluid dynamics. The growth orientation of spray was defined by image analysis. Maldistribution ratio of spray area was defined for the quantitative estimation of the spray deviation behavior. The spray deviating conditions such as the geometry of the wall and its relative position to the spray axis were fined.

Key Words: Fuel Injection, Diesel Engine, Internal Combustion Engine, Diesel Spray, Wall Jet, Coanda Effect

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に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、燃焼室の小容量化に伴い、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。これまではおもに壁面へ衝突する噴霧の研究が行われ、その場合の噴霧の成長過程⁽³⁾⁽⁴⁾や燃焼特性⁽⁵⁾が調べられてきた。しかしながら、実際の燃焼室内ではシリンダヘッドやピストンキャビティの底面と平行に噴霧が成長する場合もあり、そのような場合の壁面干渉についての研究はほとんど見られない。壁面衝突噴霧の場合にも、衝突後の噴霧は壁面に沿って広がり、複雑な巻上がり渦が生じることが報告されており⁽⁴⁾、壁面に沿って成長する噴霧の挙動解析が必要と考えられる。著者らは壁面との干渉効果をむしろ積極的に利用して噴霧の成長方向を偏向させることによって、噴霧中心部への空気導入を促進させることを試みてきた⁽⁶⁾。その結果、

壁面に沿って成長する噴霧の構造は自由噴霧と異なり、非軸対称な流動の発生が確認され、より詳細な解析が必要となってきた。

そこで本論文では、壁面に沿って成長する噴霧の一般的な性質を明確にするために、いくつかの単純な幾何形状の壁面を用い、それに沿って成長する噴霧の特性を調べた。特に、壁面方向への噴霧の成長特性を定量化し、これに与える壁面形状や噴霧と壁面との相対位置の影響を調べた。さらに、噴霧に偏向が生じる条件を具体的に求めた。

2. 実 験 装 置

実験装置の概要を図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圧力を模擬した。容器内圧力は常温下の条件で3 MPaとし、噴霧の流動に影響する空気密度は温度が常温である分だけ大きく設定した。噴射ノズルは、開弁圧19.3 MPa、噴孔長さ $L=0.6$ mm、噴孔径 $D=0.24$ mmで単孔のものを用いた。噴射ポンプ回転数は700 rpmとした。噴射率はポッシュの長管法により計測した。今回の実験では1回の噴射当たりの噴射量は13.7 mg、噴射期間は約1.8 msで一定とした。供試燃

* 原稿受付 1995年5月24日。

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

料には軽油を用いた。壁面に沿って成長する噴霧の挙動を調べるために、微動装置を介して干渉板を压力容器内に固定し、その噴射軸との距離を精密に調節した。

使用した干渉板の形状を図2に示す。干渉板は厚さ0.5 mmの鋼板を加工したもので、その表面を干渉壁面とした。干渉壁面は二つの平面部とその間の曲面部(半径50 mm)からなり、二平面のなす角度を θ 、ノズル側平面部長さを l とした。それらの値は後述する噴霧の分裂長さ L_P や噴霧角 θ といった自由噴霧の基本特性をもとに決定した。表1にその諸元を示す。ノズル先端を原点として噴射軸方向に z 軸、干渉壁面方

Table 1 Test plates

	l mm	θ deg.
Flat plate $F1$	—	0
Curved plate $C1$	10	15
Curved plate $C2$	20	30

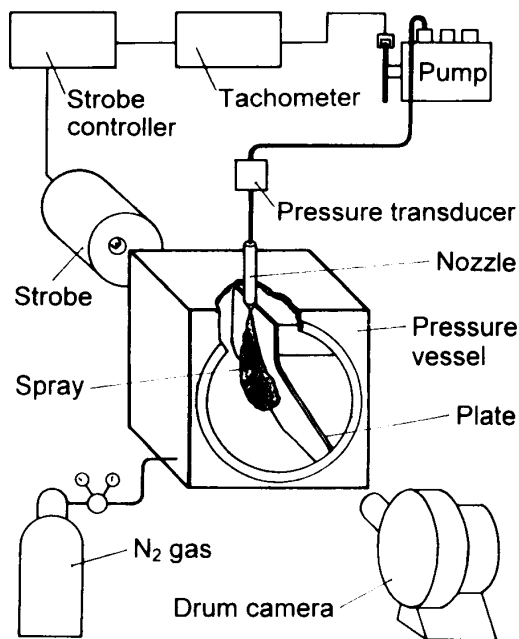


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

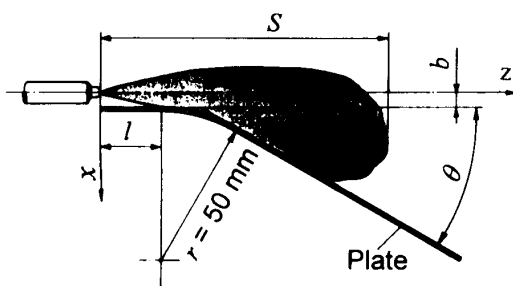


Fig. 2 Geometry of interference plate

向に x 軸を取った。干渉壁面のノズル側端面は $z=0$ 、 $x=b$ の位置に合せ、 b を1.5 mmから5.0 mmの間で変化させながら実験を行った。噴霧成長の様子は、噴霧背後からのストロボ光による映像をドラムカメラ(10 000 こま/s)によって撮影した。得られた写真より、噴霧先端到達距離 S や噴霧先端速度 V および噴霧広がり角 2α を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 自由噴霧の特性と壁面形状の決定 まず最初に、干渉壁面の形状パラメータ l と θ を決定するために自由噴霧の特性を調べた。図3に自由噴霧の成長の様子を示す。写真左端に見えるノズルから噴射された燃料は、ほぼ軸対称性を保った噴霧を形成する。噴霧先端到達距離 S 、噴霧広がり角 2α 、噴霧先端速度 V 、および噴射率 M_{inj} を求めた結果を図4に示す。一般にディーゼル噴霧では、ノズル近傍に未分裂の液柱部分が存在することが知られている⁽⁷⁾。この液柱部分は運動量密度が大きく噴霧流動に壁面の影響が現れづらいものと予想されるので、干渉壁面に長さ l の噴霧と平行な部分を設けた。噴霧の液柱部分の長さは一般に分裂長さ L_P と呼ばれ、今回はこの L_P をもとに l を決定した。この L_P の求め方にはいくつかの方法が提案

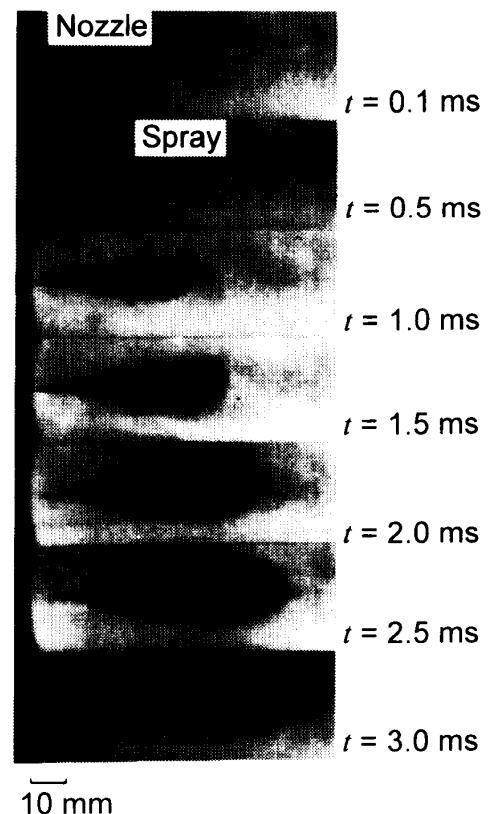


Fig. 3 High speed photographs of spray (Free spray)

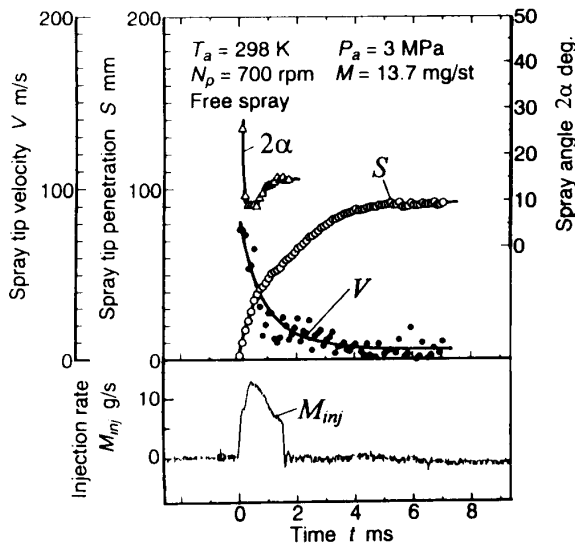


Fig. 4 Spray characteristics

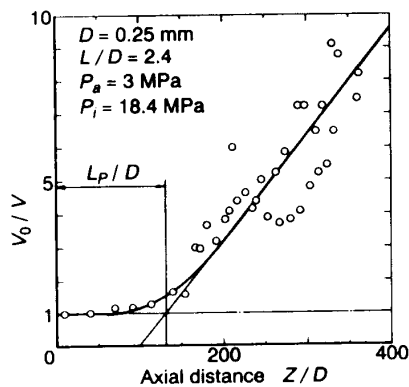
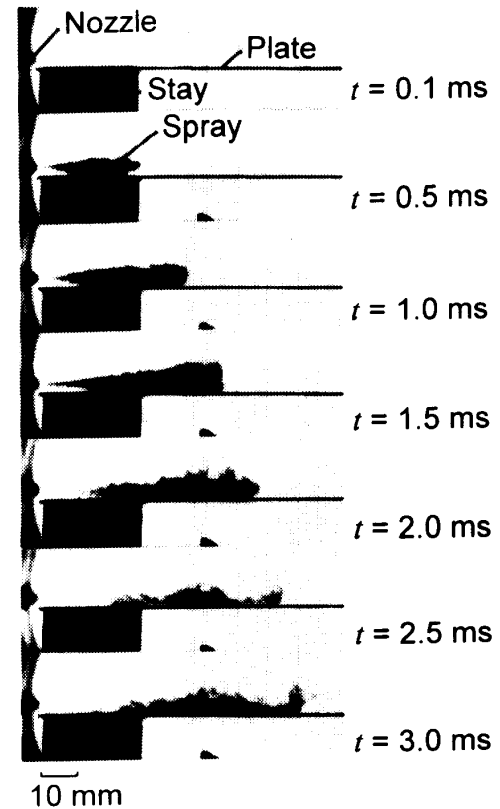


Fig. 5 Spray tip velocity

されているか⁸⁾⁽⁹⁾、本論文では、噴霧先端到達距離 S と噴霧先端速度 V をもとに L_P を求める方法を用いた⁷⁾。

図5は図4の S と V より作成したもので、 V_0/V の変化点が L_P に対応している。ただし V_0 は噴射開始直後の噴霧先端速度である。これより L_P は約 30 mm となった。また、写真を見ると噴射された燃料は噴射ノズル出口直後から 8° 程度の広がり角をもって広がるので、噴霧と壁面および曲面の一部との衝突を避けるために、ここでは直線部長さ l を L_P の $1/3$ の 10 mm とした。さらに、比較のために $l=20$ mm の壁面も用意した。また、ある程度発達した噴霧の噴霧角 2α はおよそ 15° であった。これをもとに壁面の曲がり角は噴霧の半角 α の2倍の $\theta=15^\circ$ 、4倍の $\theta=30^\circ$ のものを用意した。また、これらの曲板以外にも、基礎データの獲得のために、平面を用いた実験も行った。

3.2 壁面の干渉を受ける噴霧の挙動 まず始めに、平面に沿って成長する噴霧の挙動を観察した。図6

Fig. 6 High speed photographs of spray ($F1, b=3.5$ mm)

は b が 3.5 mm の場合の写真例である。写真左端に見えるノズルから燃料を平面に平行に噴射した。平面は写真左下の支持台で、微動装置を介して压力容器に固定されている。 $t=1.0$ ms 以降では噴霧の下部が平面と接触し始め、さらに、 $t=2.0$ ms 以降になると噴霧内の高濃度部分が平面近傍に寄ってくる様子が観察された。このような現象は、壁面に沿うガス噴流においても見られ¹⁰⁾、噴流内部における壁側と反壁側との乱流混合の差異および壁面せん断応力との相互作用によるとされている。したがって、ディーゼル噴霧についても同様な流体力学的効果が生じているものと思われる。また、 $t=2.5$ ms 以降では噴霧先端に大きなスケールの巻上がり渦が発生した。この現象は、対向壁面に衝突した後のディーゼル噴霧でも観察されており¹¹⁾、壁面に沿って成長する噴霧の一つの特徴であると思われる。

曲面に沿って成長する噴霧の写真例を図7、8に示す。図7の干渉壁面は、 $l=10$ mm、 $\theta=15^\circ$ のもので、 $b=1.5$ mm の場合である。 $t=1.0$ ms では噴霧の先端部分が直進しているが、後続の噴霧は壁面に沿って成長する。このとき噴霧の先端部分は後続の噴霧に押しつけられるように上方に成長し、巻上がり渦を形成す

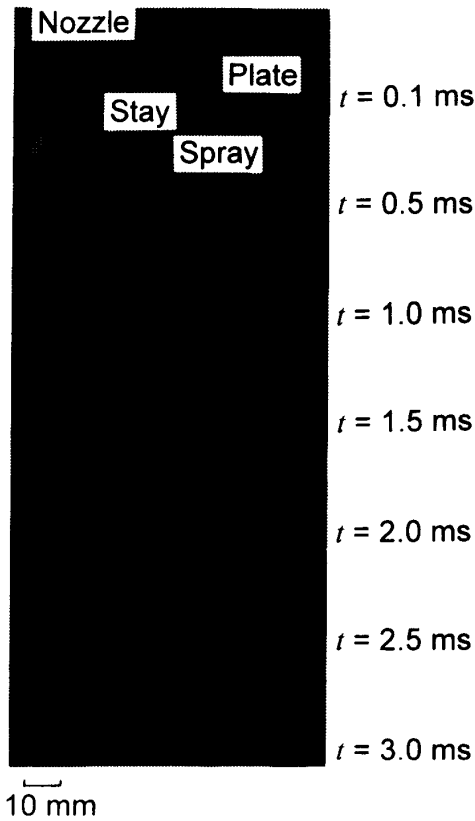


Fig. 7 High speed photographs of spray (C1, $b=1.5$ mm)

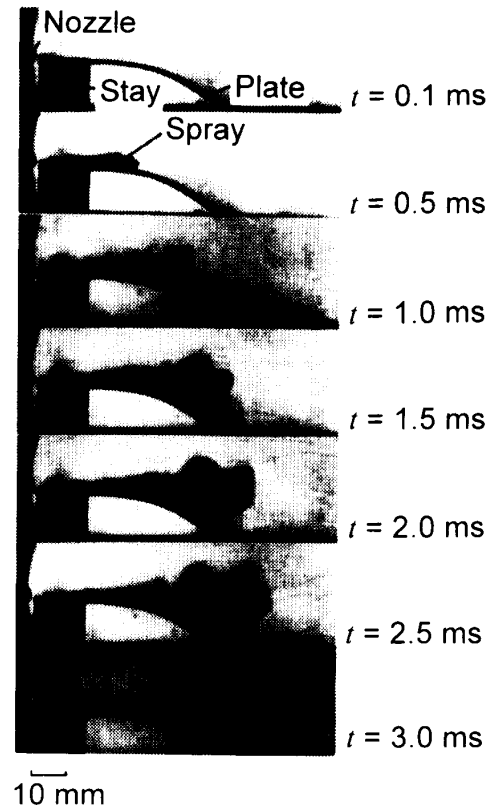


Fig. 8 High speed photographs of spray (C2, $b=1.5$ mm)

る。 $t=3.0$ ms では前述した先頭部分の突起が反壁側に成長するとともに、後続の噴霧の主流が壁面方向に大きく移動していることがわかった。このような現象は、流体力学の分野でコアンダ効果として知られている⁽¹¹⁾。また、このとき見られる巻上がり渦は、図6の平板の場合よりも大きいことがわかった。図8の干渉壁面は、 $l=20$ mm、 $\theta=30^\circ$ のもので、 $b=1.5$ mm の場合である。図7の噴霧と同様に壁面に沿って成長するが、反壁面方向への複雑な巻上がり渦も観察された。そこで、巻上がり渦も単純であり、噴霧が比較的スムーズに壁面に沿って成長している $l=10$ mm、 $\theta=15^\circ$ の壁面(C1)に注目して解析を行った。

噴霧偏向の程度を定量化する一つの手法として、次のような評価を行った。すなわち、写真より噴霧の輪郭を求め、その面積 S のうち噴射軸より干渉壁面側の面積を S_1 、反壁側の面積を S_2 として、それらの差の総面積に対する比 δ を、噴霧の総投影面積偏在率として次式で定義した。

$$\delta = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \dots\dots\dots (1)$$

したがって、自由噴霧は軸対称性がよいため $\delta=0$ に近くなる。また、 δ が正の値では壁面方向への噴霧の

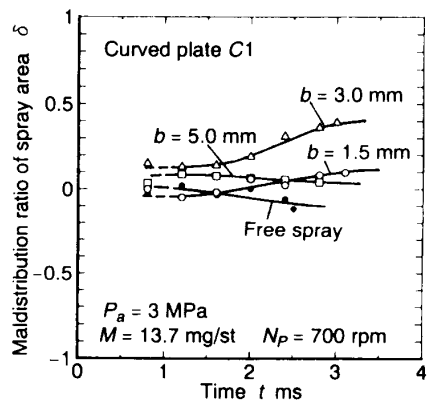


Fig. 9 Maldistribution ratio of spray area

偏在を、逆に負の値では反壁面方向への偏在を表している。図9に、噴射軸と壁面との距離 b をさまざまに変えて δ の時間変化を求めた結果を示す。 $b=3.0$ mm の場合が $t=3.0$ ms で $\delta=0.4$ と偏在率が最も大きくなった。また、 $b=5.0$ mm まで距離を離すと噴霧は直進し、その挙動は自由噴霧に近くなることがわかった。これより、壁面と噴霧との距離を5 mm 未満にすると、噴霧が壁面の影響を受けることがわかった。また、前に示した図7の写真では、 $t=1.5$ ms 以降で噴霧が壁面に沿って成長しているが、求めた δ はほぼ零

となった。これは、反壁面方向への巻上がり渦が大き
く、ここで用いている評価法では噴霧の濃度を無視し
た噴霧輪郭で解析しているためである。

そこで、以下では図10に示す画像処理により噴霧
内の粒子密度の高い部分の成長特性を調べることにし
た。すなわち、 Δt だけ時間がずれた2枚の写真(図10
では $t=1.0$ ms と $t=1.5$ ms の場合で、 $\Delta t=0.5$ ms)
について、写真像の濃度を数値化した。この写真は透
過光を用いて撮影されているので、噴霧のまったく存
在せず光が完全に透過した部分を濃度 $I=0$ 、また、完
全に光が遮られている部分(ここでは支持台の部分)を

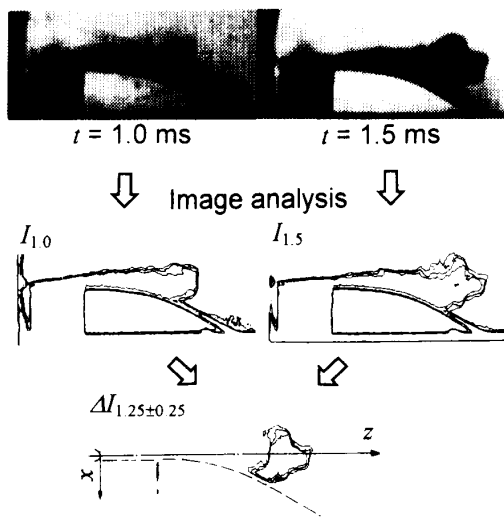


Fig. 10 Scheme of image analysis

$I=1$ とし、それぞれの画像の濃度間を256階調に分
割した。図10の中段は、これらの処理によって得られ
た濃度 $I=0.4, 0.6, 0.8$ に対応する等濃度線を表してい
る。今、時刻 t における画像濃度 $I(x, z, t)$ を I_t で表
現する。これより、時刻の異なる二つの画像の濃度差
を取って得られる像

$$\Delta I_{t+\Delta t, 2} = I_{t+\Delta t, 2} - I_{t-\Delta t, 2} \dots \dots \dots (2)$$

を求めたものが図10の下段である。ただし、ここでも
 $I=0.4, 0.6, 0.8$ に対応する等濃度線を示した。これら
は時間経過 Δt の間に噴霧が成長した領域を表してい
る。

図11に $b=1.5$ mm における噴霧成長過程の画像処
理結果を示す。 $t=0.25$ ms (噴霧先端到達距離 $S=30$
mm) まで噴霧は壁面の影響を受けずに直進するが、
その後 $t=2.25$ ms の時点では噴霧が壁面に沿った方
向に成長している様子がわかる。図12は $b=3.0$ mm
における処理結果で、 $b=1.5$ mm のときよりも壁面方
向への成長が小さく、その時期も遅くなることがわか
る。図13は $b=5.0$ mm における処理結果で、噴霧は
壁面の干渉をほとんど受けずに、直進しているのがわ
かる。これは、図9中の $b=5.0$ mm の結果と一致して
いる。もとの写真を調べると、 $b=5.0$ mm の $t=0.25$
ms では噴霧と壁面との間に気相領域が存在しており、
噴霧が壁面に接している $b=1.5, 3.0$ mm の場合より
も壁面の影響を受けづらいものと考えられる。

以上の結果から観察される噴霧に対する壁面の効果
を定量化するために、図9と同じ手法で偏在率を定義

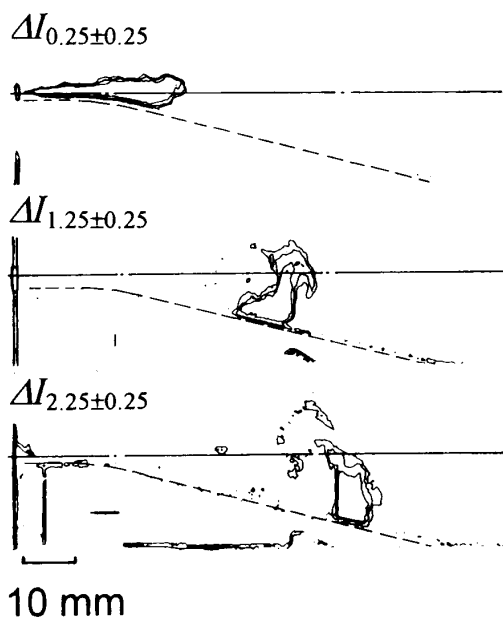


Fig. 11 Growth of spray penetration along a wall (C1, $b=1.5$ mm)

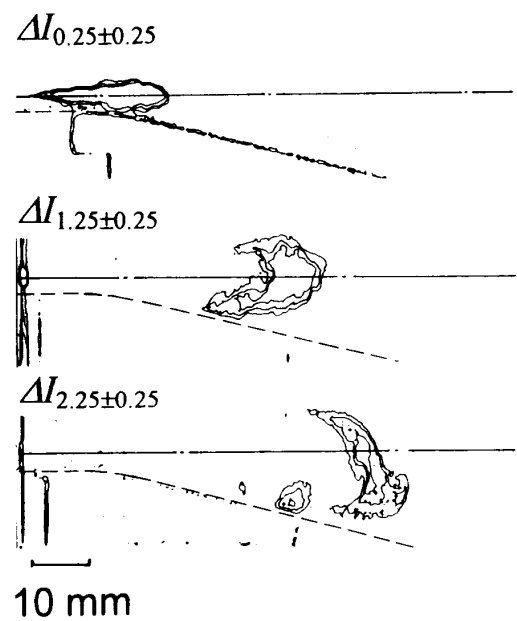


Fig. 12 Growth of spray penetration along a wall (C1, $b=3.0$ mm)

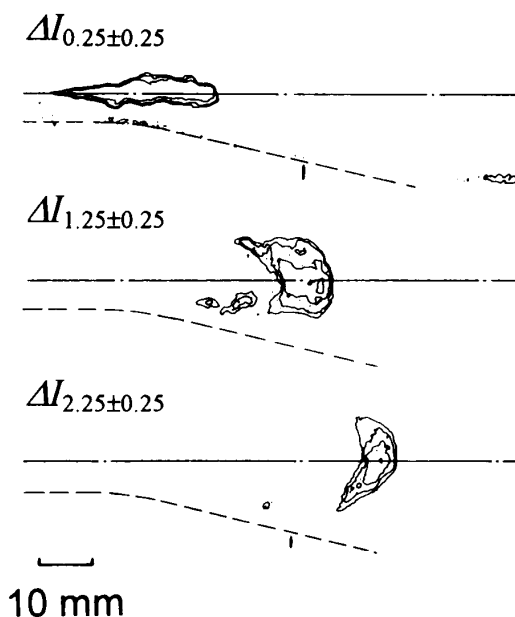


Fig. 13 Growth of spray penetration along a wall (C1, $b=5.0$ mm)

した。すなわち、 Δt の間に噴霧の高濃度部分が成長した領域を、ここでは例として、 $I=0.4$ 以上の部分の投影面積で表した。ここで、 $I=0.4$ とした理由は、図9の整理において $b=1.5$ mm の場合の濃度の薄い巻上り渦を除去するためである。すなわち、 $I=0.4$ をしきい値とした判断基準を採用すれば、反壁面方向への巻上り渦のような濃度の薄い噴霧の広がりを無視し、噴霧の高濃度部分だけの解析を行うことになる。この面積のうち、噴射軸より干渉壁面側の面積を、 A_1 、反壁側の面積を A_2 として、噴霧の高濃度成長部分の投影面積偏在率 $\epsilon_{0.4}$ を次式で定義した。

$$\epsilon_{0.4} = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、 $\epsilon_{0.4}$ が正の場合には、噴霧の高濃度部分の成長が噴射軸より壁面側で多いことになる。その結果を図14に示す。ただし、時間刻み Δt は 0.1 ms とした。また、図14中 $t=1.0$ ms 以前は噴霧の分裂が完了していないと考えられるため、ここでは議論しない。図14より、 $b=5.0$ mm では、 Δt が 0.1 ms と極めて短いために、噴霧の噴射軸に対するランダムな成長がとらえられるが、平均的には高濃度成長部分が噴射軸に対して同等のひん度で出現している。 $b=3.0$ mm の場合は、噴霧高濃度部分の成長が壁面側で多く見られるようになる。 $b=1.5$ mm の場合、 $t=2.0$ ms 以上では噴霧成長が噴射軸より壁面側でのみ発生していることがわかる。したがって、ここで述べた評価法は図9での評価法よりも写真観察より得られる偏向の現象を

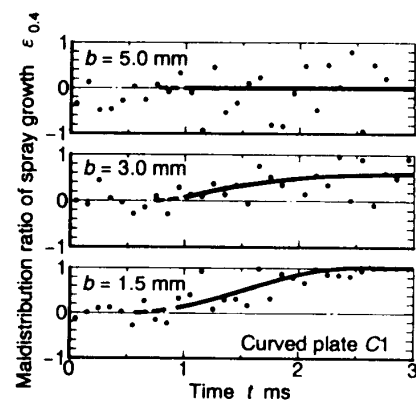


Fig. 14 Maldistribution ratio of spray growth

的確に表現しているといえる。

以上の結果から、壁面の干渉を受ける噴霧は反壁面方向に巻上り渦を形成するとともに、噴霧中心部の高濃度部分が壁面方向に曲げられることがわかった。著者らが提案している、壁面効果を利用した噴霧成長方向の制御にも、このデータは極めて有効であると考えられる。さらに、実際の機関の設計に本論文の成果を適用する場合、壁面との干渉を避けることが必要なときには、壁面と噴射軸との距離を約 5.0 mm 以上とする必要があると思われる。これとは逆に、壁面との干渉効果を利用して噴霧の方向制御を行ったり、噴霧構造を大きく変化させるには、壁面と噴射軸との距離は小さいほうがよいことがわかった。ただし、著者らの過去の実験⁽⁶⁾ではこの距離が 1.5 mm 以下になると燃料の壁面への付着量が著しく増加し、排ガス性状の悪化をもたらす可能性があるため、適切な壁面と噴射軸との距離を設定する必要がある。

4. ま と め

壁面の干渉を受ける噴霧の成長挙動を観察し、その定量的な評価を試みた。以下に得られた結論を示す。

(1) 壁面の干渉を受ける噴霧の構造は、壁面方向への移動や大きな巻上り渦の発生など、非軸対称性の著しいものになる。

(2) 平面に沿う噴霧は、成長に伴い、壁面方向に近づくとともに、反壁面方向に巻上り渦を形成する。

(3) 噴霧高濃度成長部分の偏在率により壁面効果に伴う噴霧の偏向特性の評価ができる。

(4) 曲面に沿う噴霧では、その面に沿って噴霧が曲げられることを確認した。また、その際形成される反壁面方向への巻上り渦は、平面に沿う噴霧のそれよりも大きくなる。

終わりに臨み、本研究の一部は機械学会研究分科会 RC-107 によった。実験には、当時本学学生 杉山浩央君、高橋孝輔君の協力を得た。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 廣安博之・ほか4名, 機論, 48-431, B (1982), 1402-1410.
- (2) 小西克享・ほか2名, 機論, 56-523, B (1990), 874-879.
- (3) 坂根 篤・ほか2名, 機論, 54-503, B (1988), 1861-1865.
- (4) 桂 直仁・ほか3名, 機論, 56-521, B (1990), 227-234.
- (5) 吉川 滋・ほか3名, 機論, 54-502, B (1988), 1522-1525.
- (6) Arai, M., ほか2名, *SAE Paper*, No. 941923 (1994).
- (7) 新井雅隆・廣安博之, 微粒化, 1-2-2, (1992), 40-47.
- (8) Arai, M., ほか2名, *SAE Paper*, No. 840275 (1984).
- (9) 清水正則・ほか2名, 機論, 49-448, B (1983), 2886-2892.
- (10) 村井一弘・ほか3名, 機論, 46-408, B (1980), 1544-1554.
- (11) Wille, R. and Fernholtz, H., *J. Fluid Mech.*, 23-4 (1965), 801-819.