

壁面に衝突する間欠噴流の飛散特性

Splashing Phenomena of an Intermittent Jet Impinged on a Wall

金 永一, 新井雅隆
 (Youngil KIM) (Masataka ARAI)
 群馬大学
 (Gunma Univ.)

The splashing behavior of a water jet impinging on a wall was investigated experimentally. The intermittent water jet using by EFI(Electronic Fuel Injection) nozzle was impinged on the wall. The splash ratio of the jet was defined with the splashed water divided by the total injected water. The jet after impingement forms the liquid film on the wall and further the splashing was caused by the interaction of the jet and the film. When the injected water was impinged a liquid film on the wall, the splash ratio decreased. The thicker the film on the wall, the splash ratio was more decreasing. Both of the injection period and the period between the intermittent sprays affected the splash ratio. The shorter the duration of intermittency, the spray due to a continuous spray and the splash ratio become decreasing.

Key words : Wall impingement, Splash ratio, Thin liquid film, Thick liquid film

1. まえがき

壁面に衝突する噴霧が壁面に付着する現象や壁面から再飛散する現象は、塗装⁽¹⁾や農薬の散布⁽²⁾、内燃機関における燃料噴霧の挙動^(3,4,5)など、噴霧の利用技術の根幹となる現象であるが、付着および飛散のメカニズム解析が進んでいない。この原因としては単一液滴の衝突時の飛散については多くの知見が得られている^{(6)~(9)}ものの、壁面に衝突する噴霧については飛散量の定量的な計測も少なく、衝突時に形成される液膜と飛散メカニズムの関係などが解明されていないためと考えられる。

壁面に衝突する定常液体噴流についての著者らの研究^(10,11)によれば、壁面からの飛散量は噴流の衝突速度および液体噴流の微粒化の進展とともに増大す

ることが明らかになっている。このことは噴霧の衝突エネルギーだけでなく、噴霧内の粒子径や速度などの変動が大きい場合に飛散量が増すことを示唆している。内燃機関における燃料供給などでは噴霧を間欠的に供給して流量制御を行うことが多いが、噴霧を間欠的に供給することは定常噴霧に比べて巨視的にみて変動の大きな噴霧を供給していることになり、定常噴霧の場合よりさらに飛散量が増すことが想定される。

そこで本研究では、火花点火機関用の EFI ノズルによって蒸留水の間欠噴流をつくり、その噴霧を壁面に衝突させた場合の飛散量の計測を行った。さらに繰り返し壁面に衝突させることにより壁面での液膜の状態を変化させ、液膜の形成状態と噴霧の飛散量との関係を明らかにした。

2. 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。コンプレッサによって加圧された供試液体は、圧力計により噴射圧力が計測され噴射弁(以下,EFI ノズルとする)に供給する。EFI ノズルを用いて噴霧間隔や噴射周波数などを制御することによって間欠噴流を作り、噴射量および衝突板上の液膜形成をコントロールした。一方、内径 0.49mm のホールノズルを用いて連続噴流での衝突挙動を調べ、間欠噴流との比較を行った。また、ノズルと衝突板との距離を変更可能とし、衝突距離の影響を調べた。衝突板に衝突された液体噴流の中で飛散されず衝突板上に残った液膜と、捕集用容器に滴下した液体の両者の質量を天秤で計測し、噴射量との差から飛散量を算出した。供試液体は蒸留水を用いた。なお、EFI ノズルは、ピントル式高抵抗型ガソリン用噴射弁(コイル抵抗 13.8Ω)で噴射圧力 250kPa 、噴射周波数 50Hz 、開弁期間 2.5ms の条件で噴射量が $148\text{m}^3/\text{min}$ となるものを用いた。噴霧の巨視的衝突挙動を調べるために、透過光による連続画像を高速度ドラムカメラで撮影した。

図2に間欠噴流のパターンと実験条件を示す。液体噴流の衝突間隔による影響を調べるために噴射周波数および噴射期間の変更が可能なコントローラにより各噴射条件に制御した。噴射圧力は 250kPa で一定とした。

噴射期間を $\tau = 2.5\text{ms}$ とし噴射周波数を $f = 1\text{Hz}$ とすると、それぞれの噴射後の安定した液膜に次の噴射による液塊が衝突する現象が調べられる。また、噴射期間を $\tau = 9.9\text{ms}$ とすると閉弁期間は 0.1ms と短くなり連続噴射に近い状態となる。なお、噴射量は噴射回数および一回当たりの噴射期間とともに増加し、 $\tau = 9.9\text{ms}$ での一回の噴射量は $\tau = 2.5\text{ms}$ の場合の約6回分に相当する。

衝突板と捕集容器の概略を図3に示す。衝突板の外径は D_p 、捕集容器の内径は D_p' 、衝突板の縁と捕集用容器内径との間を δ_{slu} とした。 D_p が小さいと液膜の現象の確認がしにくく、大きいと衝突により飛散された液滴が再び衝突板上に落ちることとなり、正確な飛散率を求めにくくなる。また、 δ_{slu} が小さ

いと液膜となった液体を捕集することが難しくなる。予備実験を行った結果、捕集量の測定値のばらつきは10%程度以内に収まっている。これらを勘案して、本研究では種々の現象の確認が容易でありながら飛散量の捕集に影響を及ぼさない $D_p = 40\text{mm}$ 、 $\delta_{slu} = 3\text{mm}$ を使用した。

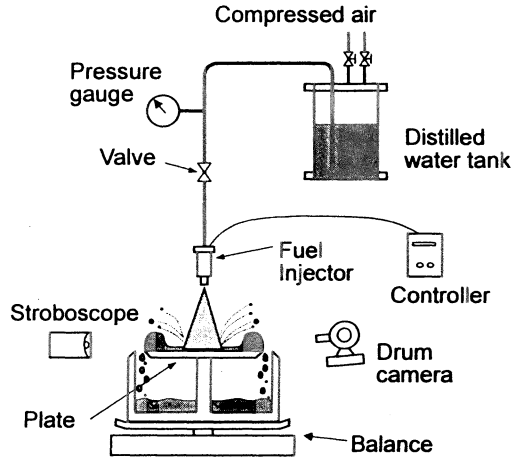
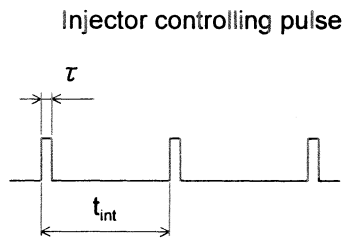


Fig.1 Experimental setup



| Item | Experimental conditions | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|----|-----|-----|
| Injection pressure P_i [kPa] | 250 | | | |
| Injection frequency f [Hz] | 1 | 50 | 100 | 100 |
| Injection duration t_{inj} [ms] | 1000 | 20 | 10 | 10 |
| Nozzle opening term τ [ms] | 2.5 | | | 9.9 |

Fig.2 Injector controlling pulses and experimental conditions

EFI ノズルから噴射された液体噴流は衝突板に衝突し、液滴となって飛散される液体と衝突板上で液膜となり捕集用容器に滴下する液体とに分かれる。ノズルから噴射された液体噴流が衝突板に到達し衝突すると飛散が始まる。噴射回数が増加すると衝突板上に液膜が形成されるが、その液膜の周辺はリム状に盛り上がっている。このリムの部分は衝突板上を半径方向に広がる液膜の流れの跳水現象と見られるが、この跳水現象に伴いリムも半径方向に広がっていく。なお、噴射が終了し衝突板上の液膜が安定したときの薄い液膜の直径(リム内側の径)を D_{fmin} とした。

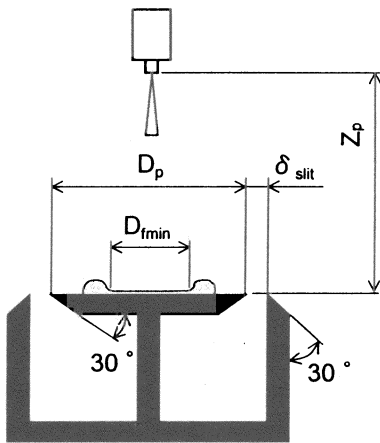


Fig.3 Impingement plate

3. 壁面に衝突する間欠噴流と液膜の挙動

図 4 は間欠噴射による液体噴流が衝突板に衝突したときに生ずる衝突噴霧の代表的な模様を示している。噴射期間は 2.5m sec 、噴射間隔は 20m sec である。時間は噴射開始からの経過時間を表している。(a)の左側の写真(1.67m sec の写真)は噴射回数が一回目の途中の状態である。噴射された噴流は衝突板に衝突し飛散されるが、噴射終了後(右側に示した 11.68m sec の写真)では、飛散されずに残った噴霧が収縮しながら、液滴の凝集した状態の液塊が中心部

に形成されている。(b)に示した 2 回目の噴射では飛散されずに衝突板上に残った液塊に噴流が衝突することとなり、一回目の噴射後に凝集していた液塊の再分裂が生じるとともに大きい液滴が飛散する。さらに、(c)の状態のように噴射回数が増加 ($n = 50$) することによって衝突板上には安定した薄い液膜が形成される。さらに噴射回数が多くなると衝突板上の薄い液膜は半径方向に広がっていき、前述したようにリムが形成され中心部の薄い液膜部分の直径 D_{fmin} が大きくなる。

各噴射回数において噴流の衝突により衝突板上に形成される薄い液膜の直径 D_{fmin} を図 4 と同様な写真撮影から求めた結果を図 5 に示す。一般に飛散されずに残った液滴は衝突板上に薄い液膜を形成する。噴射回数が増加すると D_{fmin} は大きくなるが、ある噴射回数に到達すると(この条件では約 30 回)一定の直径の大きさを保つこととなる。この一定の直径は噴射流量によって大きさが決まる。

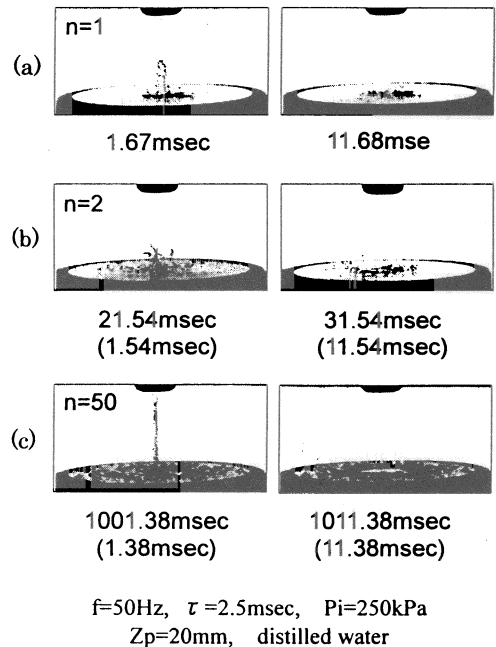
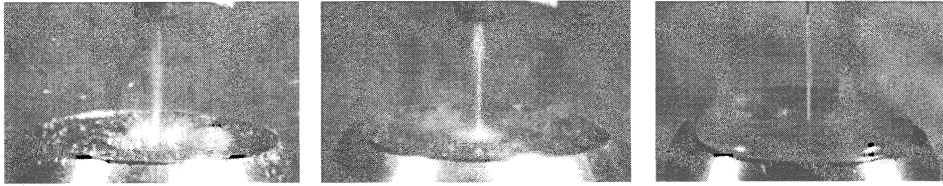


Fig.4 Behavior of impingement jets at various repetition number of injection



EFI Nozzle
 $\tau = 2.5\text{msec}$, $f = 50\text{Hz}$
 $Z_p = 20\text{mm}$, $P_i = 250\text{kPa}$
 $V = 12.3\text{m/sec}$
 $t = 10\text{sec}$
Distilled water

EFI Nozzle
 $\tau = 9.9\text{msec}$, $f = 100\text{Hz}$
 $Z_p = 20\text{mm}$, $P_i = 250\text{kPa}$
 $V = 12.3\text{m/sec}$
 $t = 10\text{sec}$
Distilled water

Hole Nozzle
 $D_n = 0.49\text{mm}$
 $Z_p = 20\text{mm}$, $P_i = 450\text{kPa}$
 $V = 12.1\text{m/sec}$
 $t = 10\text{sec}$
Distilled water

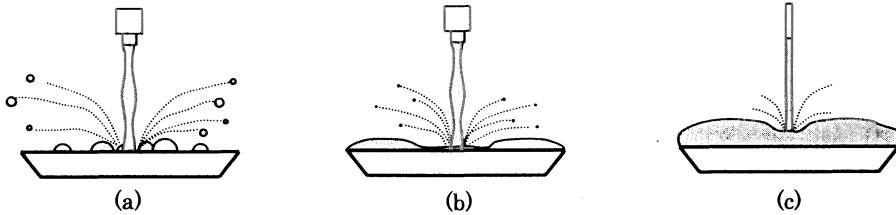


Fig.6 Photographs and sketches of impingement jets

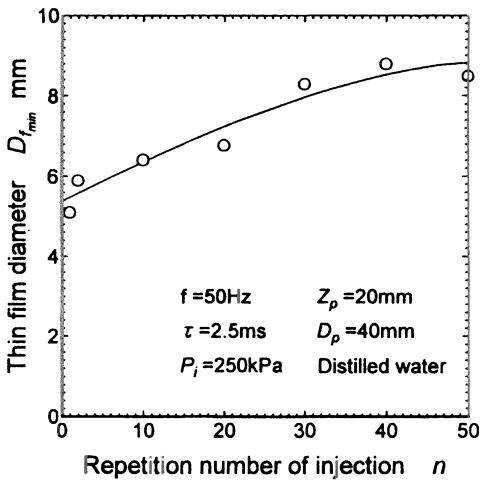


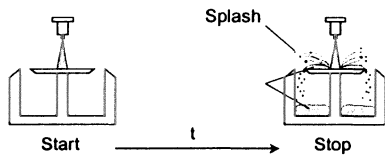
Fig.5 Relationship between thin film diameter and repetition number of injection

図 6 に示した写真とスケッチは各ノズルから衝突板までの距離を $Z_p = 20\text{mm}$ 、液体噴流の初速度を約 12m/sec とし、噴射開始から 10 秒後に液体噴流が衝突板に衝突したときの液膜と液滴の飛散挙動である。状態(a)は 20msec の噴射間隔をもつ間欠噴流である。

衝突板に衝突された液体噴流は衝突板上に大きい液滴を形成しながら合体し始める。このように液滴が衝突板上に凝集した状態の所に噴流が衝突する結果、もとの噴流中の液滴よりさらに大きな液滴が飛散する。一方、閉弁期間が 0.1msec と短く連続噴射に近い状態である状態(b)では、衝突板の中心部に形成される安定な薄い液膜 (0.1mm 程度の液膜) に液体噴流が衝突する。この場合、飛散される液滴径は小さい。ホールノズルからの連続噴流が衝突する(c)の場合では、衝突板上に厚い液膜 ($1\text{mm} \sim 3\text{mm}$ 程の液膜) が形成され、飛散する液滴はさらに細かくなりその飛散量も減少する。図 6 では噴射開始から 10 秒だけ経過した状態であり、(a)に対して(b)は 20 倍の質量の噴流が全体として衝突する。(a), (b), (c)の噴射条件でそれぞれの経過時間を変えて噴射総量を等しくしても、この状態は変わらなかったため、三者の相違は噴射流量ではなく、間欠噴流の噴射間隔に支配されていると考えられる。すなわち、噴射間隔が 17.5msec となる(a)の場合では安定した液膜ができにくく、連続噴流では安定した液膜ができやすいため、このような相違が生じたものと考えられる。

4. 壁面からの飛散量

EFI ノズルから噴出された噴流は衝突板に衝突した後、飛散される液滴と衝突板上で液膜を形成するものと捕集容器に落ちる液滴とに分けられる。飛散率 $\epsilon_s(t)$ は図 7 に示すように噴射開始からある時間 t までの全噴射量 $Q_{total}(t)$ と、衝突板上に残った液滴と捕集容器に滴下した液体量 $Q_{sample}(t)$ から求めた。ここで、 $Q_{splash}(t)$ は全噴射量から捕集された液滴量 $Q_{sample}(t)$ を差し引いた量である。



$$\epsilon_s(t) = \frac{Q_{splash}(t)}{Q_{total}(t)} = \frac{Q_{total}(t) - Q_{sample}(t)}{Q_{total}(t)}$$

Fig.7 Splash ratio

噴射間隔が 1 秒と長い条件での各噴射回数における飛散特性を図 8 に示す。1 回目の衝突では全噴射量の約 45% が飛散され、噴射回数の増加とともに飛散率も徐々に増加する傾向が得られた。噴射回数が 10^3 のオーダーに到達すると噴射回数の増加にもかかわらず、飛散率は約 95% でほぼ一定になる。これは、噴射回数が増加すると衝突板上に形成される液膜の厚さと薄い液膜の直径に変化があまり見られなくなるためと考えられる。また、噴射回数が少ない範囲において飛散率のばらつきが多いのは、衝突後飛散されずに衝突板上に残留した液塊同士の収縮過程が一様でないためと考えられる。

液体噴流の衝突距離を変化させその影響を調べた結果を図 9 に示す。液体噴流が十分に発達して分裂が終了していると思われるノズル先端からの距離 $Z_p = 150mm$ と、まだ分裂が終了していない $Z_p = 20mm$ の場合の飛散特性を調べた。噴射回数約 10 回までは衝突距離が長い $Z_p = 150mm$ でやや高い飛散率が得られているが、その後は衝突距離に対す

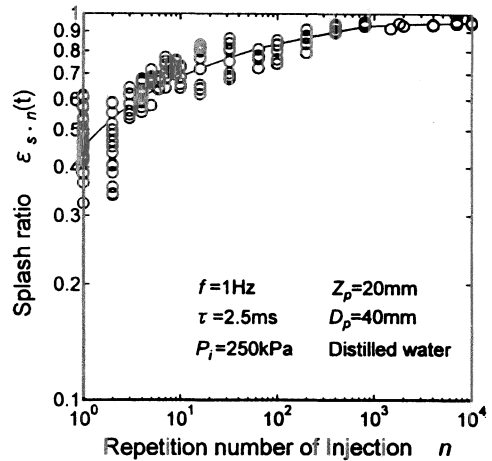


Fig.8 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f=1Hz$, $\tau=2.5ms$)

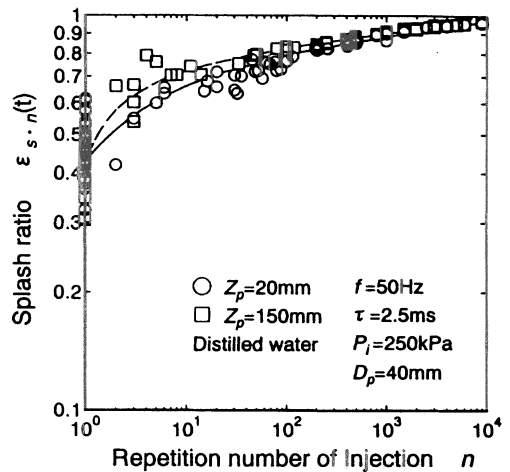


Fig.9 Effect of injection distance on splash ratio

る影響が見られない。

次に噴射間隔の影響について検討すると、図 9 の条件では噴射間隔が 20m sec であり、図 8 の結果(噴射間隔 1 秒)に比べ噴射間隔が非常に短くなっているが、飛散率の増加傾向には影響を及ぼさない。噴射周波数を 100Hz と早くした場合の噴射回数と飛散率の関係を図 10 に示す。この条件では前に示した結果とは異なり噴射回数が増えると飛散率はわずかに減少するが、さらに噴射回数が増えていくと飛散率は増加する傾向を示している。これは、噴射周波数が

早くなると連続噴流に近い状態となり、衝突初期では衝突板上に厚い液膜が形成しやいため飛散率が増加しないと思われる。しかし、さらに噴射回数が増加し、ある領域(この場合では約 20 回)に達すると跳水現象により衝突板中央部に薄い液膜が形成され飛散率は徐々に増加する傾向を示す。

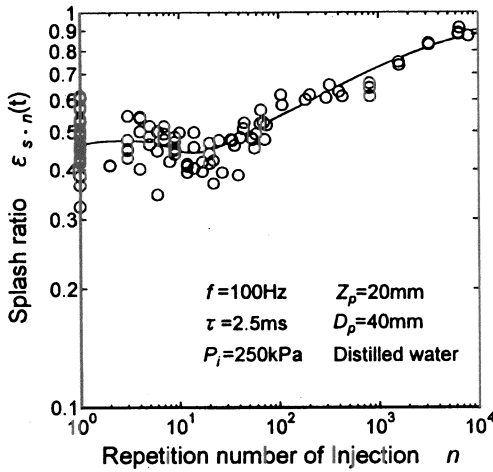


Fig.10 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f=100\text{Hz}$, $\tau=2.5\text{ms}$)

一方、これらの条件よりさらに開弁時間を長くし、連続噴射に近い条件での噴射回数と飛散率の関係を調べた結果を図 11 に示す。噴射回数約 20 回までは、衝突板上に薄い液膜を形成することとなり飛散率は増加していく。しかし、噴射量が多く噴射間隔が短い条件では、噴射回数が増加するに従って、衝突板上に厚い液膜を形成するようになる。この厚い液膜は噴射された液体噴流の衝突エネルギーを吸収することとなり飛散率を減少させる原因になると考えられる。

跳水現象の有無は噴射条件によって異なるが、噴射間隔長くなおかつ噴射量が少ない場合には衝突板上の液膜が形成されにくいため跳水現象は見られない。しかし、このような条件でも噴射回数がかなり多くなると衝突板上の液膜同士が結合され液膜を形成するため、最終的には跳水現象が見られる。なお、間欠噴射でも噴射間隔が短く噴射量が多い条件では衝突板上に液膜を形成しやすいため跳水現象が早い

時点から見られる。

図 12 に同じ噴射周波数において噴射期間(開弁時間)の変化による飛散率特性を示す。 $\tau=9.9\text{ms}$ での一回の噴射量は $\tau=2.5\text{ms}$ の場合の約 6 回に相当する量である。噴射量が増加すると衝突板に厚い液膜が形成しやすく、そのために飛散率の増加を防ぐ結果となった。

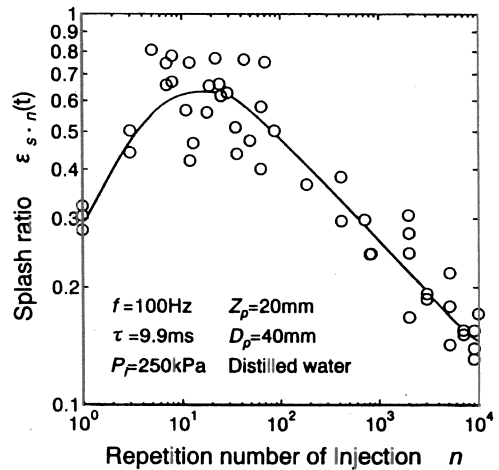


Fig.11 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f=100\text{Hz}$, $\tau=9.9\text{ms}$)

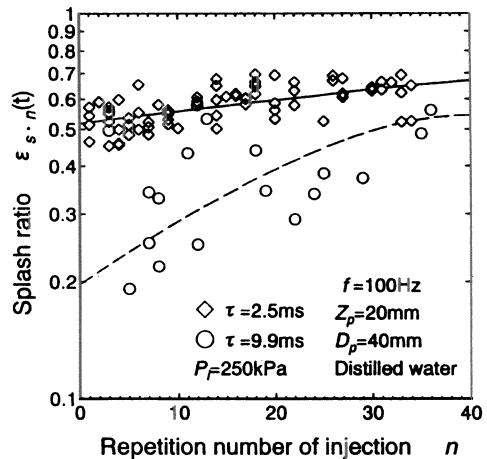


Fig.12 Effect of nozzle opening term

これまで述べてきた飛散率の挙動を衝突板上の液膜の状態との関係でまとめると次のようになる。まず、最初の噴射では噴流によって図 6(a) のような凝

集した液塊が形成され、飛散率は30%~60%の値となる。その後、安定した薄い液膜が形成されると飛散率は増加する。しかし、噴射量が多くなると衝突板上に厚い液膜が形成され、噴射された多くの噴流が衝突板に至らずに厚い液膜に吸収されるため飛散率は減少する。これらの挙動の変化は噴射間隔によって異なり、噴射間隔が狭くなると噴射初期には噴流が液塊に衝突し飛散率が増加していくが、液塊同士士の結合により厚い液膜が形成しやすくなる。

5. 間欠噴流と連続噴流の比較

図9において $Z_p = 20mm$ の測定条件における噴射回数を噴射経過時間に置き換え、間欠噴流に関する噴射経過時間と飛散率の特性の関係として図13に示す。単一液滴による衝突実験結果によると、常温の衝突板に衝突した液滴は液膜として衝突板上に広がった後、分裂が行われず収縮し液滴として飛散するとされている。この条件のように間欠噴霧の噴射間隔が長い場合では、飛散されずに衝突板に広がった液塊は収縮し始める。その結果、衝突部の液膜が厚くなり収縮する液塊に後続の噴霧が衝突するようになり、飛散率は増加していく。しかし、時間経過とともに衝突板の中心部に形成される薄い液膜が半径方向へ広がり、一定の直径を保つこととなる。この条件では噴射直後から約10秒で薄い液膜が形成される。その後は衝突板上に形成されている液膜に噴流が衝突し、噴射された液体噴流のほとんどが薄い液膜を形成し分裂しながら飛散すると考えられる。

噴射周波数を100Hzと早くし、噴射期間を9.9msecにした場合には閉弁時間が0.1msecとなり連続噴流に近い条件となる。図14にはこの条件での噴射経過時間と飛散率の関係を示す。噴射初期では衝突板への衝突により飛散率は高い値を示している。噴射経過時間が長くなると、多くの液滴が飛散されずに衝突板上に液膜として残留する。これによって衝突板上に形成される厚い液膜は液体噴流の衝突エネルギーを吸収することとなり、時間経過とともに飛散率は減少していく。

ノズル径0.49mmの連続噴流における噴射経過時

間と飛散率の関係を図15に示す。液体噴流の初速度は図14の条件とほぼ同じである。噴射経過時間とともに飛散率は減少し、図14と類似した傾向を示している。また、全体的に飛散率が低くなっているのは、EFIノズルでは噴射ノズル出口から微粒化が開始され、変動の大きな噴流が衝突しているのに対して、ホールノズルからの噴流は微粒化が進行していない変動の少ない噴流であるためと考えられる。

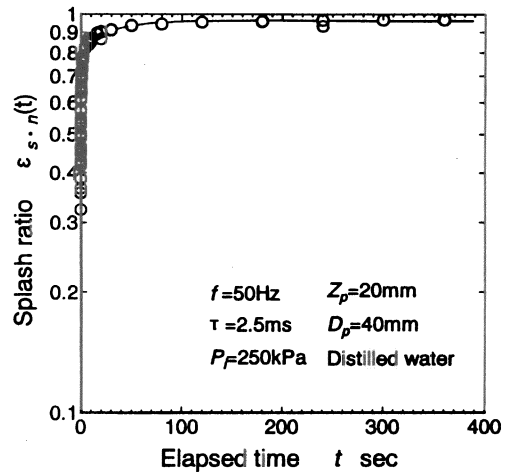


Fig.13 Relationship between elapsed time and splash ratio (f=50Hz, τ=2.5ms)

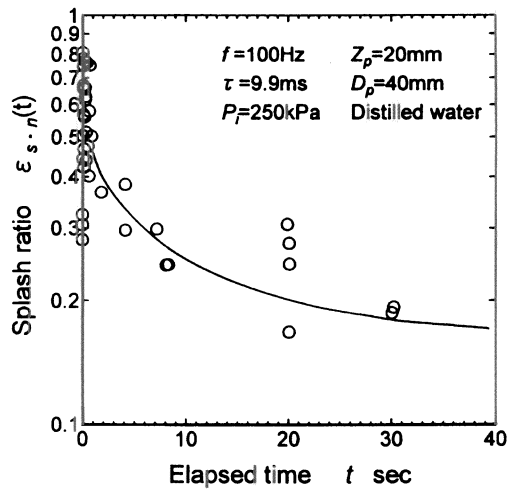


Fig.14 Relationship between elapsed time and splash ratio (f=100Hz, τ=9.9ms)

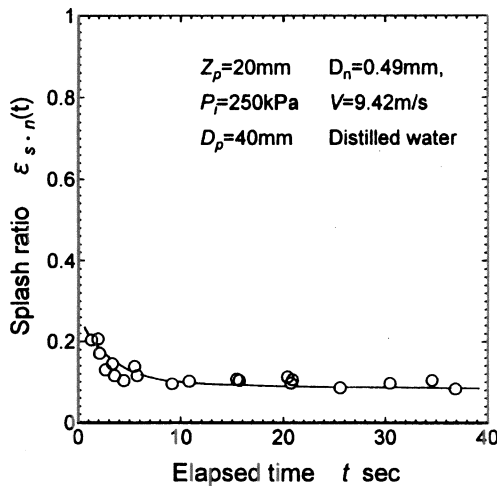


Fig.15 Relationship between elapsed time and splash ratio with hole nozzle ($D_n=0.49\text{mm}$)

6. まとめ

火花点火機関用の EFI ノズルを用いて $V=12\text{m/sec}$ 程度の間欠噴流をつくり、その噴流を衝突板に衝突させた場合の飛散特性について調べた結果、以下のことが分かった。

- (1) 衝突板上に薄い液膜が存在していると飛散量は増加する。しかし、厚い液膜が存在すると飛散率は減少する。
- (2) 衝突板上で液滴が凝縮し、不安定な液塊を形成する状態で噴流が衝突した場合、飛散率は薄い液膜と厚い液膜に噴流が衝突する場合の中間の値となる。
- (3) 間欠噴流の噴射閉弁期間が短い場合の飛散率は、連続液体噴流と同じ傾向の結果が得られた。
- (4) 噴射速度の等しいホールノズルからの液体噴流に比べ EFI ノズルから噴射される液体噴流は微粒化初期の噴流の変動により飛散量が増加する。

参考文献

1. 森田, “塗装における微粒化と微粒化技術”, 微粒化, Vol.2-2, No.3, pp.22-32, 1993.
2. 坂田, 砂元, “医薬品と液体の微粒化”, 微粒化,

Vol.2-2, No.4, pp.8-16, 1993.

3. J. D. Naber and R. D. Reitz, “Modelling engine spray/wall impingement”, SAE Paper 880107, 1988.
4. T. Momoda, et al., “Development of Direct Injection Gasoline Engine Study of Stratified Mixture Formation”, SAE Paper970539, 1997.
5. T. Tomota, et al., “Numerical Analysis of Mixture Formation of a Direct Injection Gasoline Engine”, COMODIA 2001, pp.170-177, 2000.
6. J. Senda, T. Kenda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto, “Modelling spray impingement considering fuel film formation on the wall”, SAE Paper 970047, 1997.
7. W.I. Geldrop, et al., “Numerical and experimental drop impact on solid dry surface”, 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems(ICLASS-2000), 2000.
8. K. Araki and A. Moriyama, “Deformation behavior of a liquid impinging on a hot metal surface”, Int. Cont. on Liquid Atomization and Spraying Systems(ICLASS-82), 1982.
9. Y. Morozumi, et al., “Numerical Simulation of Coalescence and Separation Behavior during Binary Droplets Collision”, 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-2000), 2000,
10. 金, 他, “液体噴流の壁面衝突(第1報, 衝突の挙動と液滴の飛散量), 微粒化, Vol.9, No.26, pp.10-17, 2000.
11. Y. Kim and M. Arai, “Droplets Splash Related with a Wall Impingement of Liquid Jet”, 8th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-2000), 2000.



金 永一
群馬大学・工学部
工学研究科博士後期課程
群馬県桐生市天神町 1-5-1
Tel. 0277-30-1522
Fax.0277-30-1521
略歴：1992年 武蔵工業大学
大学院・修士課程終了
主として壁面に衝突する液体噴
流の研究



新井 雅隆
群馬大学・工学部 教授
群馬県桐生市天神町 1-5-1
Tel. 0277-30-1522
Fax.0277-30-1521
略歴：1977年 東北大学大学院
博士後期課程終了
主として微粒化機構，ディーゼ
ル噴霧，低重力・高重力場での熱
伝達，高温燃焼に関する研究