

EFI ノズルによる燃料噴霧の壁面衝突特性

Wall Splashing Phenomena of a Fuel Spray Injected by an EFI Nozzle

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

In a port fuel injection system of gasoline engines, a large part of fuel injected into an intake port adheres on its wall and an inlet valve. Consequently, the wall impinging spray interaction might occur the generation of several harmful emissions. There are uncontrollable mixture formation, an accidental backfire and unburned hydrocarbons. Therefore, it is important to analyze the fuel behavior during the spray-wall interaction. In this study, splash characteristics of the impingement and reflecting or scattering behavior of the droplets of fuel injected from EFI nozzle were studied experimentally. A test fuel used is LAWS and its physical characteristics are similar to the conventional gasoline except for the ignitability. Since the liquid film formed immediately after impinging on an impingement plate is unstable, it is easy to cause secondary disintegration. In addition, in the case of the intermittently impingement on the impingement plate with LAWS nearly characteristics of gasoline, the splash ratio is around 0.6. When an injection period becomes longer, the liquid film will become thick and the splash ratio will fall about 10 percent. On the other hand, when the injection period of an intermittent spray is long, the same time lapse as a continuous spray is shown.

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

1. まえがき

現在, 自動車の燃料噴射方式で使われている吸気管内噴射方式の場合, 噴射された燃料が吸気管や吸気弁に付着し液膜化されることにより失火や未燃 HC 排出の原因となる⁽¹⁾. また, シリンダー筒内直接噴射方式の場合, 噴霧がピストンやシリンダーライナーへ衝突し混合気形成や排出ガスに影響を及ぼしていること^(2~5)が知られており, 衝突噴霧の基本的な挙動特性を調べるために単一液滴による壁面衝突実

験^(6~8)や数学的なモデリング^(9~12)が多く提案されている.

しかし, 噴霧の衝突特性は噴射弁の特性, 燃焼室内の流動, 壁面温度および壁面の表面粗さなどの条件によって大きく変化し, 噴霧液滴の連続的かつ多発的な衝突を単一液滴の挙動をもとに解析する数学的な体系化には現状では限界がある. また, 噴霧の衝突挙動と衝突による飛散量について定量的な測定を行なった研究が少ないのが現状である. 著者らはこれまで, 連続噴霧と間欠噴霧を

原稿受付: 2003 年 10 月 17 日

壁面に衝突させ、壁面に形成する液膜の厚さと液滴の飛散率との関係などについて報告した⁽¹³⁻¹⁵⁾.

そこで本研究では、燃料性状がガソリンと類似した LAWS を供試燃料とし、ガソリン機関ポート噴射用の EFI ノズル(以下、EFI ノズルとする)を用いて液体噴霧の衝突により形成される液膜の特性や衝突噴霧の液滴の飛散量を定量的に測定し、衝突噴霧の挙動を明らかにした。

2. 実験装置

図 1 に実験装置の概略を示す。供試燃料は加圧空気によって加圧し圧力計により設定圧力に合わせて EFI ノズルに供給される。噴射周期および開弁期間の変更が可能なコントローラを用いて噴射周期などを制御することによって間欠噴霧を作り、噴射量および衝突板上の液膜形成をコントロールした。材質がジュラルミンで直径 $D_p = 40mm$ の衝突板に衝突した液体噴霧の中で飛散されずに衝突板上に残留した液膜と、捕集用容器に捕集される液体を捕集し天秤でその重量を計り、飛散量を算出した。微粒化現象には表面張力や粘性が問題となるため、それらの物性値がガソリンと近い LAWS(セントラル化工株式会社製)を供試燃料として用いた。表 1 に LAWS とガソリンの代表的な物性値を比較して表している。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)でノズル径 $0.81mm$ 、ピントル外径 $0.72mm$ であり、噴射圧力 $250kPa$ 、噴射周期 $100H_z$ 、開弁期間 $2.5msec$ の条件でガソリンの噴射量は $148cm^3/min$ のものを用いた。衝突噴霧の巨視的衝突挙動を調べるために、ストロボとドラムカメラにより噴霧の高速度撮影を行った。

間欠噴霧のパターンと実験条件を図 2 に示す。コントローラにより表に示すような各噴射条件に制御することによって液体噴霧の間欠噴霧を形成し、その影響を調べた。噴射周波数 f を $100H_z$ にし、開弁期間 τ を $9.9msec$ とすると閉弁期間は

$0.1msec$ と短くなり間欠噴霧ではあるがほぼ連続噴射に近い状態となる。なお、噴射圧力 P_i は $250kPa$ 一定とした。

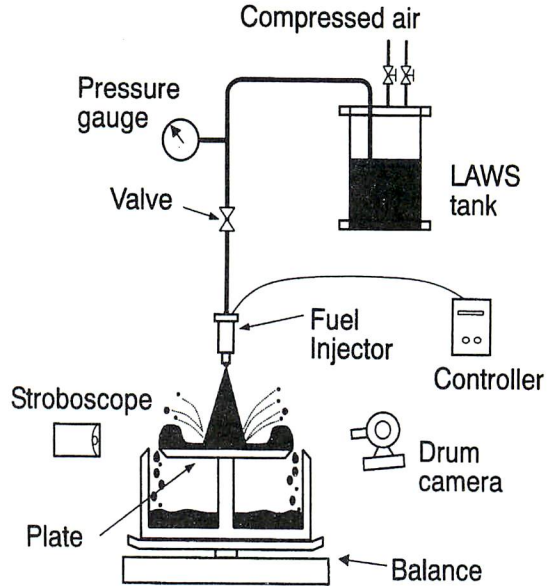
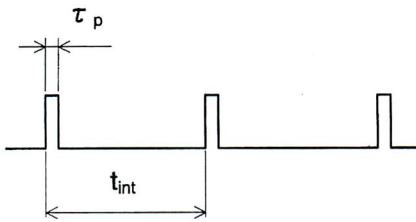


Fig.1 Experimental setup

Table1 Properties of LAWS and Gasoline

Parameters		Unit	LAWS	Gasoline
Composition	Paraffin	Vol. %	44	-
	Naphthalene	Vol. %	26	-
	Aromatic	Vol. %	30	-
	Sulfur	ppm	2	-
Specific gravity(15/4°C)		-	0.797	0.78
Surface tension(20°C)		dyn/cm	26.4	20
Kinetic viscosity		m ² /s	1.08	29
Ignition point		K	523	530
Flash point		K	322	208
Distillation range		K	423-478	309-470
Explosion lower limit		%	0.6	1.4

Injector controlling pulse



Item	Experimental conditions			
Injection pressure P_i [kPa]	250			
Injection frequency f [Hz]	1	2	50	100
Injection duration t_{int} [ms]	1000	500	20	10
Nozzle opening term τ_p [ms]	2.5, 5, 9.9			

Fig.2 Pattern of an intermittent spray and experimental conditions

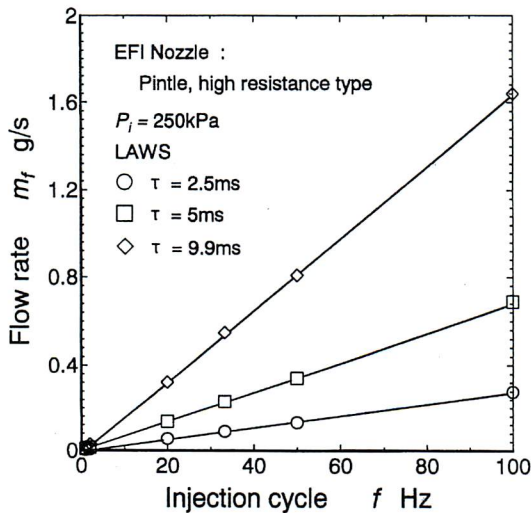


Fig.3 Flow rate of EFI nozzle

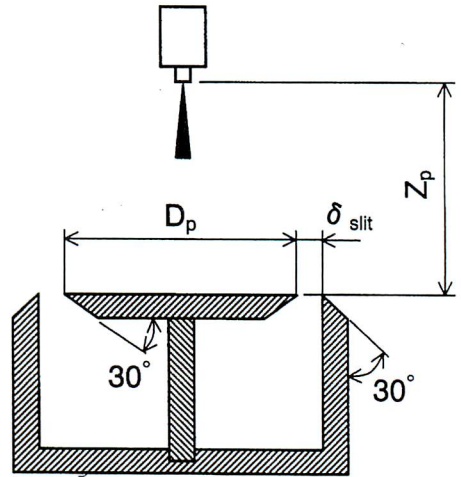
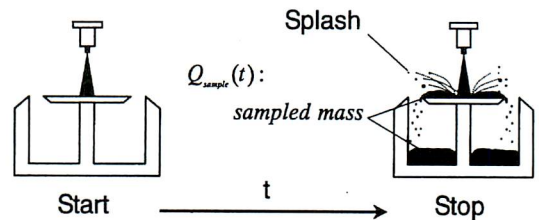


Fig.4 Impingement plate for measuring the splash ratio



$$Q_{total}(t) = \frac{m_f \cdot t}{\rho_f}$$

$$Q_{film}(t) = Q_{sample}(t) : \text{measured}$$

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

Fig.5 Schematic diagram of splash ratio estimation

各噴射周期における噴射量を測定した結果を図3に示す。噴射量は噴射圧力250kPa、噴射周期100Hz、開弁期間2.5msecの条件で約139cm³/minであり、ガソリン噴射時とほぼ同じ噴射量である。

噴射量は噴射回数および一回当たりの開弁期間とともに増加し、 $\tau = 9.9\text{msec}$ での一回の噴射量は $\tau = 2.5\text{msec}$ の場合の約 6 回に相当する。

衝突板と捕集容器は、既報⁽¹³⁻¹⁵⁾にて衝突板上での液膜挙動の現象の確認が容易であるとともに飛散率を適切に求めることができた $D_p = 40\text{mm}$ で、かつ液滴の捕集に影響を及ぼさない $\delta_{slit} = 3\text{mm}$ のものを使用した。衝突板と捕集容器の概略を図 4 に示す。

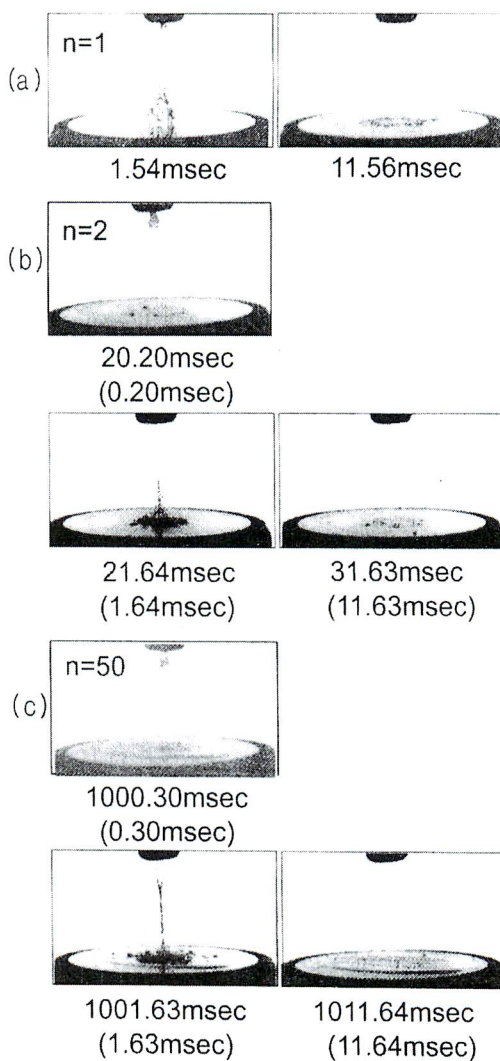
飛散率 $\varepsilon_s(t)$ は図 5 に示すように噴射開始からある時間 t までの全噴射量 $Q_{(total)}(t)$ と、衝突板上に残った液滴 $Q_{(film)}(t)$ と捕集容器に捕集された液体量 $Q_{(sample)}(t)$ から求めた。ここで、 $Q_{(splash)}(t)$ は飛散量である。

3. 壁面に衝突する間欠噴霧と液膜の挙動

3.1 飛散の挙動

図 6 は間欠噴射による液体噴霧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。開弁期間は 2.5msec 、噴射間隔は 20msec である。時間は噴射開始からの経過時間を、 n は噴射回数を表している。(a) の左側の写真は 1 回目の噴射で噴射開始から 1.54msec が経過した噴射途中の状態である。噴射された噴霧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 11.56msec の写真) では、飛散されずに残った噴霧が収縮し、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) の写真は 2 回目噴射の状態である。最初の噴射から 20.20msec が経過 (2 回目噴射開始から 0.20msec が経過) した状態では 1 回目の噴射で飛散されずに衝突板上に残った液塊が確認できる。さらに、(b) の下段左側は 2 回目の噴射開始から 1.64msec が経過 (最初の噴射から 21.64msec が経過) した状態を示している。この状態では、飛散されずに衝突板上に残った液塊に衝突することになり、衝突噴霧はあまり飛散されずに液塊に吸収される。すなわち、2 回目以後では前

回の衝突で飛散されずに衝突板上に残った液塊または液膜の影響を受けることとなり、その挙動は $n=1$ の場合とは異なったものになる。さらに、噴射回数が 50 回目で最初の噴射開始から 1001.63msec が経過した (c) の状態のように噴射回数が増加すると、衝突板上に形成された液塊は厚い液膜状になっていて噴射される噴霧を吸収して



$$f = 50\text{Hz}, \quad \tau = 2.5\text{msec}, \quad Z_p = 20\text{mm}$$

Fig.6 Behavior of impingement jets at various repetition number of injection

いる。噴射回数の少ない場合では衝突した噴霧自体の跳ね返りによる飛散が見られるが、(c)のように噴射回数が増加すると噴霧は跳ね返らず、液塊または液膜の二次分裂が液滴の飛散の中心となる。さらに、噴射回数が多くなると衝突板上に形成される液膜が厚くなり、噴霧はその液膜に吸収され液膜の二次分裂のみが発生することになった。なお、(b)と(c)において()内に示している時間は、各噴射回数において噴射開始からの経過時間を表している。

3.2 噴射条件と飛散率

図6と同じ実験条件での噴射回数と飛散特性の関係を図7に示す。噴射回数が増加すると飛散率はやや減少するが、噴射回数約10回からは再び飛散率が増加する傾向を示している。しかし、噴射回数の増加に対し飛散率の増加傾向は著しくない。この条件では、噴射間隔が20msecと噴射期間2.5msecに比べて十分長いので噴射された噴霧が衝突板上に広がった後に収縮し易く、衝突板上に厚い液膜が形成され易い。したがって、噴霧は常に厚い液膜に衝突し、噴霧の運動エネルギーが液膜に吸収されるため飛散率の増加が見られないと考えられる。

噴射間隔が1秒とかなり長い条件での噴射回数と飛散特性の関係を図8に示す。この条件では、1回目の衝突では全噴射量の約60%が飛散されるが、噴射回数が増加しても飛散率の増加は見られずほぼ一定となっている。また、図7と図8において噴射回数が少ない範囲で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および液膜形成過程が一樣でないためと考えられる。

図9に噴射周期を100Hzと早くした場合の噴射回数と飛散率の関係を示す。この条件では噴射回数が少ない領域では飛散率が減少するが、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、噴射間隔が10msecと短くなると液塊同士が合体し液膜が形成される前の状態で次の液体噴霧の衝突が生じるため、液膜の二次分裂が発生せず

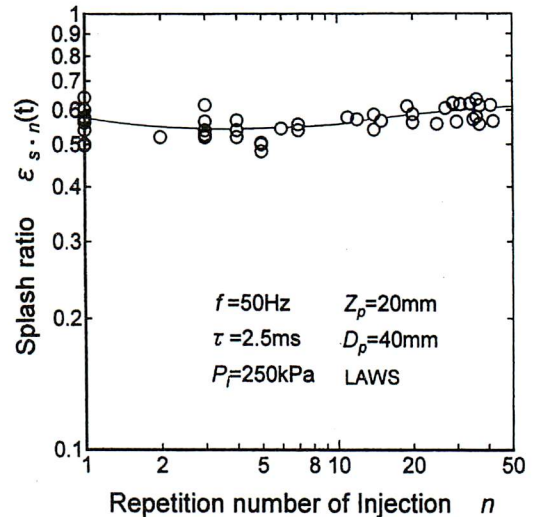


Fig.7 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f = 50\text{Hz}$, $\tau = 2.5\text{msec}$)

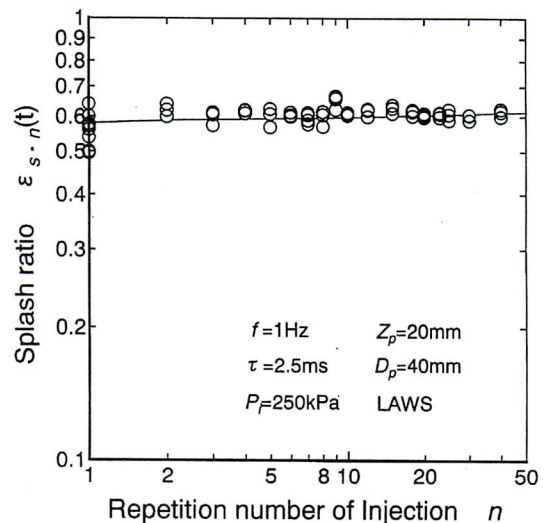


Fig.8 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f = 1\text{Hz}$, $\tau = 2.5\text{msec}$)

飛散率が低下したものと考えられる。しかし、噴射回数がある領域（この場合では約5回）に到達すると飛散率も徐々に増加していく。これは、中心部の液膜が半径方向に広がっていき衝突により液膜からの飛散、すなわち前述した液膜の二次分裂が生じるからであると考えられる。

図10に開弁期間を $\tau = 2.5\text{msec}$ と一定とした条件で噴射間隔の影響を比較して示している。 $f = 1\text{Hz}$ のように噴射間隔が長くなると衝突板上に一樣な液膜が形成され易くなる。液膜の二次分裂による飛散率の増加は噴射回数によらず一定となるため、飛散率は0.6程度で高く、噴射回数が増加しても変化は見られない。噴射間隔が $f = 50\text{Hz}$ と $f = 100\text{Hz}$ のように短い場合、噴射初期では衝突板上に液膜の形成ができ難く、液膜の二次分裂が発生しにくいいため飛散率は $n = 2 \sim 5$ にて低下する。しかし、噴射回数を重ねることによって衝突板の中心部に一樣な液膜を形成するようになるので(この場合、約15回付近)二次分裂により飛散率は増加し、しかも噴射条件による差が無くなりほぼ一定となる傾向を示している。

3.3 液膜厚さを考慮した検討

開弁期間が同じ条件で噴射弁の噴射周期を変えた場合の影響を図11に示す。開弁時間 $\tau = 5\text{msec}$ は $\tau = 2.5\text{msec}$ より噴射量が約2倍となるので、衝突板上に厚い液膜ができやすく噴霧の運動エネルギーを吸収することとなり飛散率は少なくなる。

開弁時間を 9.9msec 、噴射間隔を 10msec とし連続噴霧に近い状態での飛散率を測定した結果を図12に示す。この条件では、衝突板上に厚い液膜を形成し易く噴霧の運動エネルギーを吸収するため飛散率は噴射開始から徐々に減少していきほぼ一定となる。

間欠噴射と連続噴射を比較するためノズル径 0.49mm のホールノズルから蒸留水を連続噴射した場合の結果を図13に示す。連続噴射の場合では衝突板上の液膜が経過時間とともに厚くなり、それに伴って飛散率も低下する。ここで図12と図13を

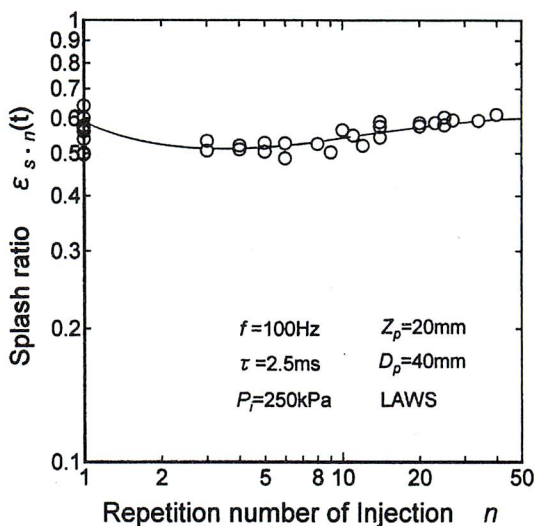


Fig.9 Relationship between splash ratio and repetition number of injection ($f = 100\text{Hz}$, $\tau = 2.5\text{msec}$)

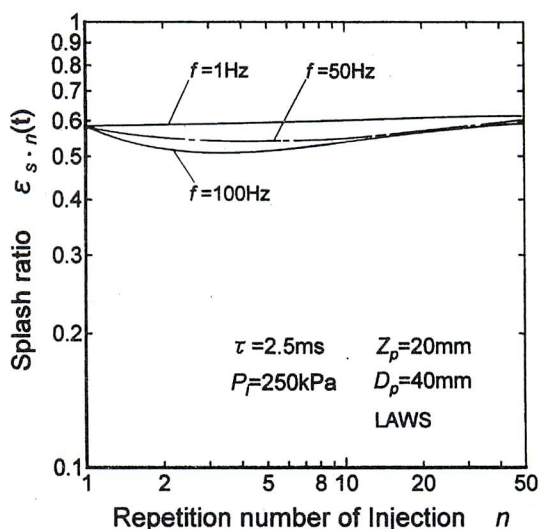


Fig.10 Relationship between splash ratio and injection duration ($\tau = 2.5\text{msec}$)

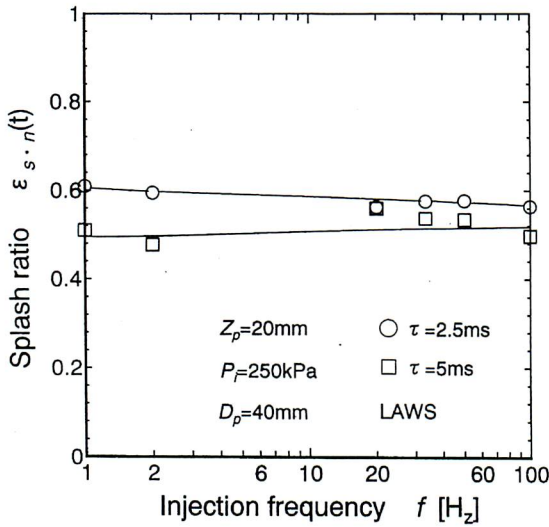


Fig.11 Relationship between splash ratio and nozzle opening period

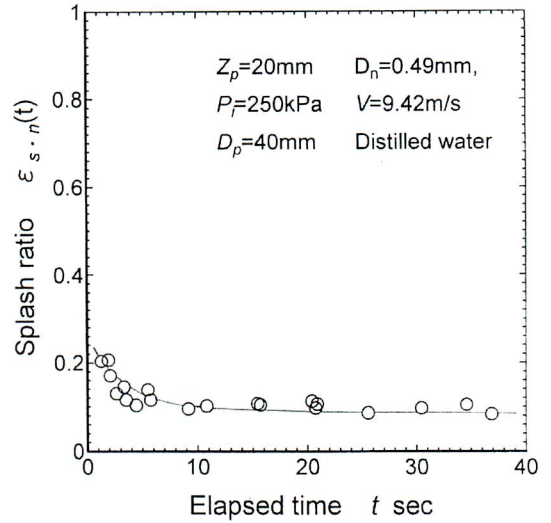


Fig.13 Relationship between elapsed time splash ratio with hole nozzle ($D_n = 0.49mm$)⁽¹⁵⁾

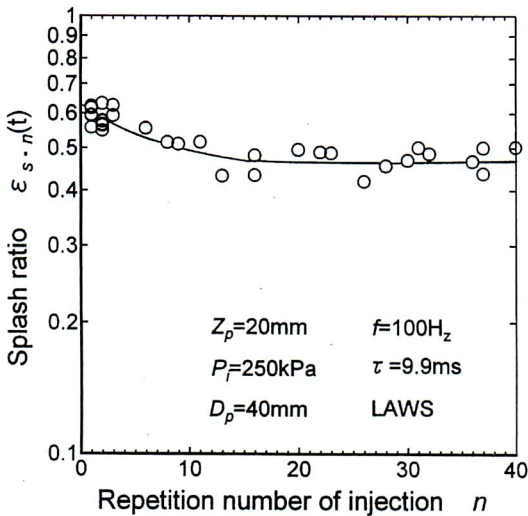


Fig.12 Splash ratio at $\tau = 9.9m$ sec and $f = 100Hz$

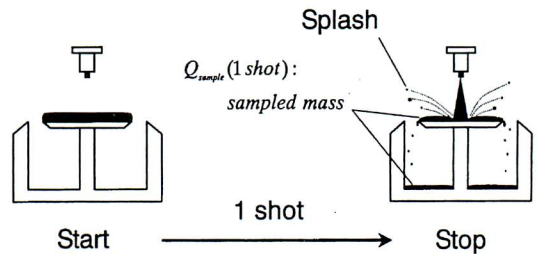


Fig.14 Splash ratio on one-shot injection

比較すると、噴射回数および時間とともに飛散率は低下する傾向は一致する。すなわち、図 12 に見られた飛散率の低下は連続噴射の場合と同じく液膜厚さの増加が主要因と考えられる。

3.4 液膜厚さと飛散率

液膜厚さが飛散率に及ぼす影響を調べるために図 14 に示すように衝突板上にあらかじめ既知の液膜を

形成し、一回のみの噴射を行った。衝突板上に形成する液膜厚さに必要な供試燃料を質量で測定し、注射器を用いて均一となるように衝突板上に分散させた。液膜厚さが一定となったところに一回だけ噴射を行い、衝突板上に残った液滴と捕集容器に落ちた液滴と全噴射量から飛散率を求めた。

液膜の厚さが飛散率に及ぼす影響を調べるために衝突板上に人為的に一定の液膜を形成させた場合の結果を図 15 に示す。なお、 $\tau = 2.5\text{ms}$ と $f = 100\text{Hz}$ の条件で一回の噴射で飛散率が $\epsilon = 0.6$ の場合、衝突板上に残った 40% の液体が液膜を形成すると仮定する。この場合、噴射初期では衝突板の中心部のみに液膜を形成するため、直径 20mm の液膜を形成すると仮定し液膜の厚さを概算すると約 0.03mm となる。すなわち、図 14 に示した衝突板上に人為的に作った液膜の厚さは 0.02mm~1.0mm であり、前述の衝突回数とともに液膜の直径が大きくなることを考えると、およそ $n = 2$ から $n = 50$ の範囲の液膜厚さと同じである。飛散率は噴射量の 10% 以下であり、図 6~図 12 に示した液膜の存在しない場合 ($n = 1$) と液膜が存在する場合 ($n = 2$ 以上) と異なる飛散率が非常に低い結果となった。この理由としては、噴射間隔が $f = 1\text{Hz}$ と長い条件の図 8 の条件を除く図 6~図 12 の結果は液膜自体が非定常に流動していて不安定であるものに対し、図 15 の結果は安定な液膜に衝突した結果である。すなわち、液膜自体の安定性の程度が噴霧の衝突による二次分裂を発生するか否かの大きな要因になっていることを示している。言いかえると、噴霧の衝突により形成される液膜は、その衝突の直後はきわめて不安定な特殊な状態になっていると解釈することができる。安定な液膜の厚さと飛散率の関係は図 15 において、液膜の厚さが増すと飛散率が低下する傾向が得られた。これは、液膜が厚くなると噴霧が衝突板に衝突せず安定な液膜に衝突することとなるため、噴霧の運動エネルギーが液膜に吸収され飛散率が増加しないものと考えられる。このように衝突板上に安定した液膜が形成されると液塊の二次分裂が起こりにくいため前の条件よ

り飛散率は少なくなる。なお、衝突板上にこのような安定した液膜が均一になるような条件は実際にはあまり発生しない現象である。ここに示した図 6~図 12 と図 15 の結果からは、吸気管内に付着する液膜に対する噴霧の挙動は安定した液膜への噴霧の衝突現象とは異なる現象であること、また液膜自体の二次分裂が液膜の流動様式によって大きく左右されることを示している。図 6 からは噴射された液体は衝突板上に多くの液塊を生じ、それがまず周辺へとドーナツ状に広がり、その後収縮して液膜を形成するが、その収縮運動に伴って二次分裂を起こすことがある。したがって、次に噴射される噴霧の衝突はその収縮運動に伴う二次分裂を促進する作用を及ぼしていると解釈できる。

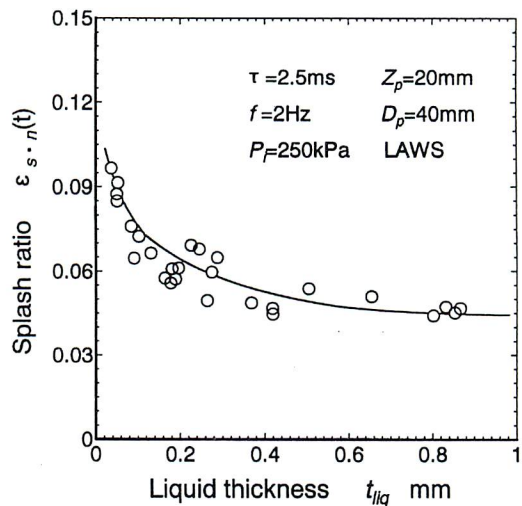


Fig.15 Effect of stabilized liquid thickness on splash ratio

まとめ

火花点火機関用の EFI ノズルを用いて間欠噴霧をつくり、その噴霧を衝突板に衝突させ液滴の形成と噴霧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) 衝突板に衝突した直後に形成される液膜は不

安定であり、二次分裂を起こしやすい。

(2) ガソリンと近い性状のLAWSを間欠的に衝突板に衝突させた場合の飛散率はおよそ0.6付近である。

(3) 噴射期間が長くなると液膜厚さは厚くなり、飛散率は1割程度低下する。

(4) 間欠噴流の噴射閉弁期間が短い場合は連続液体噴流と同じ傾向の時間経過を示す。

参考文献

1. Keiso Takeda, et al. : Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-Valve Engine with Port Fuel Injection During Cold Starting and Warm-up, SAE Paper 950074, 1995
2. Werlberger and W. P. Cartellieri, "Fuel injection and combustion phenomena in high speed DI diesel engine observed by means of endoscopes high speed photography", SAE Paper 870097, 1987.
3. G. R. Lee and C. Morley, "Fuel-wall impaction as a mechanism for increased hydrocarbon emissions from fuel heavy ends", SAE Paper 952523, 1995.
4. Y. Matshi and K. Sugihara, "Sources of Hydrocarbon emissions from a small direct injection diesel engines", JSAE Review, Vol.7, pp. 4-11, 1986.
5. O. W. Jayaratne and B. T. Mason, "The coalescence and bouncing of water drop at air/water interface", Proc. R. Soc. Lond-A, 280, pp.545-656, 1964.
6. Keiso Takeda et al., SAE Paper, No.950074, (1995)
7. 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
8. 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.
9. H. Sindano and J. C. Dent, "Modelling of injected fuel film development and evaporation in a wall-wetting

direct injection diesel engine", Int. Conf. On Combustion in Engines - Technology and Applications, ImechE, 1988.

10. L. Allocca, U. Amato, C. Bertoli and F. E. Corcione, "Comparison of models and experiments for diesel fuel sprays", Int. Symp. On Diagnostics and Modelling of Combustion in IC Engines", pp.255-261, 1990.
11. T. Tabata, Y. Ishii, T. Takatsuki and K. Yokota, "Numerical calculation of spray mixing process in a DI diesel engine and comparison with experiments", SAE Paper 950853, 1995.
12. M. Kobayashi, Y. Tanabe, J. Senda and H. Fujimoto, "Visualization and quantitative analysis of fuel vapor concentration in diesel spray", 11th Int. Combustion Engine Symp., pp.256-270, 1993.
13. 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.
14. Y.I. KIM and Masataka ARAI, "Droplets splash related with a wall impingement of liquid jet", Proc. of ICLASS-2000, pp.594-599.
15. 金, 他, "壁面に衝突する間欠噴流の飛散特性, 微粒化, Vol.11, No.33, pp.1-9, 2002.



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