

液体噴流の壁面衝突 (第1報, 衝突の挙動と液滴の飛散量)

Wall Impingement Phenomena of a Liquid Jet (1st Report, Impingement behavior and splash ratio of droplets)

金 永一, 天谷 賢児, 荻原 五郎, 新井 雅隆
(Youngil KIM) (Kenji AMAGAI) (Goro OGIWARA) (Masataka ARAI)
群馬大学
(Gunma Univ.)

The general behavior of liquid film formed by the impingement of liquid jet, and droplets being splashed from an impingement point had been experimentally studied. The liquid jet was impinged against the impingement plate, and the liquid film flowing on the plate was inhaled by a suction pump. The impingement behavior of liquid jet could be classified into five domains. On the other hand, it was verified that the splash ratio of droplets from impingement point was governed by the initial velocity of liquid jet and the occurrence of break-up. When the initial velocity was so slow that a smooth thick water layer was formed on the plate, there were no splashed droplets. When the velocity was so high that a thin liquid film was formed, the liquid became splashed from the impingement point. The faster the initial velocity was, the higher the splash ratio was. Also the longer the impingement distance, the higher the splash ratio was attained. When the impingement distance was larger than the break-up distance of the liquid jet, the splash ratio became more than two times higher than the case of short impingement distance.

Key words: Wall Impingement, Splash Ratio, Hydraulic Jump, Thin Film, Liquid Jet

1. まえがき

有害排出ガスを低減しながら, 出力および優れた燃費を向上させることは自動車に与えられた課題となっており, これまでに多くの研究が行われている. 吸気ポート噴射式ガソリンエンジンにおいて, 噴射した燃料が吸気管や吸気弁に付着して液膜化することにより始動時や過渡運転時の失火や未燃 HC の排出が増加するため, 吸気ポート内の噴霧や液膜の流動の研究^{(1)~(4)}が行われている. ガソリン筒内噴射エンジンが開発され^{(5)~(7)}実用化されているが, この場合にも燃料噴霧がシリンダライナを直撃し未燃 HC の排出をもたらす⁽⁸⁾, また, ライナ上の潤滑油の油膜を希釈することがある. さらに, ピストン頂部への衝突も避けられないものである. 直接噴射式ディーゼ

ルエンジンでも燃料噴霧のピストンやシリンダライナへの衝突が混合気形成過程や排出ガスに影響を及ぼすことが知られていて, これまでにも多くの研究が行われている^{(9)~(14)}. また, 比較的低速の液柱状噴流が壁面に衝突する際の壁面液膜流やそこに発生する液滴の挙動に関してもいくつかの研究が見られる^{(15)~(18)}. これらの研究では主に液柱が連続して壁面に衝突する場合を取り扱っており, 層流や乱流といった流動状態と衝突後の流れの状態との関連に注目している. しかしながら, ノズルと壁面との距離が液柱の分裂長さよりも長い場合にみられるような, 液滴列と壁面の間欠的な衝突現象に関しては比較的定量的なデータが少ないのが現状である.

そこで本論文では, 噴流衝突によって形成される液膜や衝突時に飛散される液滴の特性などの特性を明らかにするために, 分裂前の液柱と分裂後の液滴列を円盤状の衝突板に衝突させ, これらの衝突噴流の挙動を明らかにし, 液滴の飛散量を定量的に測定したので報告する.

2. 実験装置および飛散量の測定

2. 1 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。コンプレッサによって加圧された水は流量計と圧力計で設定流量に合わせてノズルに供給される。ノズルから噴出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捕集される液体とに分かれる。捕集された液体はポンプによって吸引し、天秤でその重量を計った。飛散量は噴出流量と捕集量の差から算出した。また、液膜厚さは電圧を印可した細い針の接触法により測定した。使用液体は水道水を用いた。なお、予備実験で用いた供試ノズルは、 $L_n/D_n=50$ となるように製作したノズル内径が異なる5種類であるが、本報告では液体噴流の挙動の確認が容易な $D_n=1.19\text{mm}$ のノズルを用いた。

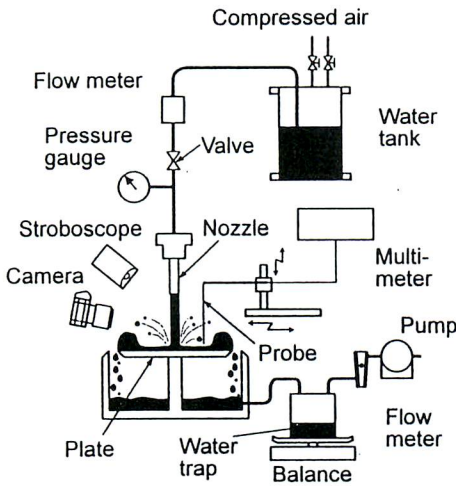


Fig.1 Experimental setup

2. 2 衝突板

衝突板と捕集容器の概略を図2に示す。衝突板の外径は D_p 、捕集容器の内径は D_p' である。衝突板の縁と捕集容器内径との間を δ_{slit} とした。なお、予備実験を行った結果、 δ_{slit} 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。また、大きいと衝突により飛散した液滴までも捕集容器に捕集されてしまう。これらを勘案して、本実験では表1に示すように種々の現象の確認が容易な $D_p=40\text{mm}$ と $D_p=60\text{mm}$ の衝突板と吸引流量の影響を受けずに捕集が可能な δ_{slit} として

Table 1 Dimensions of impingement plate and vessel

	D_p (mm)	D_p' (mm)	δ_{slit} (mm)
Plate 1	40	46	3.0
Plate 2	60	65	2.5

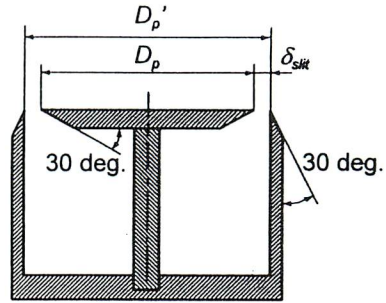


Fig.2 Impingement plate

2.5mm と 3mm を採用した。

2. 3 飛散量の測定

供試ノズルから噴出された液体噴流は衝突板に衝突し、飛散される液滴と液膜を形成した後に捕集容器に落ちる液体に分けられる。飛散率は全噴射量と捕集容器に捕集された液体量から次式で求めた。

$$\epsilon_s = \frac{Q_{splash}}{Q_{total}} = \frac{Q_{total} - Q_{film}}{Q_{total}} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_s は飛散率、 Q_{total} は全噴射量、 Q_{film} は捕集された量、 Q_{splash} は飛散量である。

図3は液体噴流が衝突板に衝突したときに生ずる液膜の代表的な模様を表わしている。 Z_p は供試ノズルから衝突板までの距離である。衝突板にできる液膜の厚さで薄い液膜の厚さを W_{min} とし、厚い液膜は W_{max} とした。液膜は条件によって衝突板全体に厚い液膜ができる場合から薄い液膜だけになる場合もある。一般的には衝突直後は薄い液膜でありその後半径方向に流れ、ある位置から急に厚い液膜に変化する。この現象は跳水と呼ばれている⁽¹⁹⁾。跳水によって形成されるリムの半径 R_h が衝突板の縁まで広がると、 W_{max} はリム部の高さ W_h に一致する。流量がさらに増加すると W_h は低くなる。ノズルから噴出される液体噴流の初速度やノズル出口から衝突板までの距離によって上記の現象が異なるため以下にその特性を調べた。

3. 衝突の挙動

3. 1 分裂長さとは液体噴流の衝突の挙動

初速度(ノズル出口での平均速度)の異なる各液体噴流について、噴流の基本的な特性である分裂長さとは液体噴流が衝突板に衝突したときの液膜の挙動を図4に示す。波線で表示した曲線は分裂長さを表している。分裂長さは初速度が増加していくとともに長くなり最大値(この場合の初速度は約 $V=1.5\text{m/s}$)を示した後に急激に減少し、その後再び増加するという典型的な曲線を示す⁽²⁰⁾。この場合、初速度の増加に伴い平滑噴流から遷移噴流、波状噴流の順に遷移し、遷移噴流域で分裂長さとは不連続的に短くなる。図4の縦軸はノズル先端から衝突板までの距離を表しているので、この分裂長さの曲線は衝突時の噴流の形態を表す境界線とも考えられる。すなわち、この図においては波線より下は液柱状態での衝突が、波線の上は分裂液滴列の衝突が生じている領域である。

衝突の状態には図中に示すように5つの領域が存在する。この各領域に対応する写真とスケッチを図5に示す。衝突挙動の区分は初速度に依存していることがわかる。また、図4の $V=6\text{m/s}$ 付近の液体噴流では、分裂点を前後にして領域IIIから領域IVに区分が変わるように衝突の状態が異なっている。

図5に示した写真とスケッチはノズルから衝突板までの距離を $Z_p=30\text{mm}$ とし、分裂前の液体噴流が衝突板に衝突したときの液膜の挙動である。領域Iでは、液体噴流の初速度が遅く運動エネルギーが小さいため衝突板に厚い液膜を形成する。初速度が大きくなると液膜の厚さは徐々に薄くなり液膜の中に気泡の発生が見られる領域IIとなる。ここまでは衝突板上に形成され

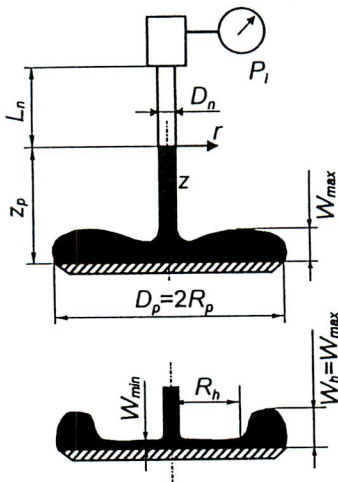


Fig.3 Impingement behavior and parameters

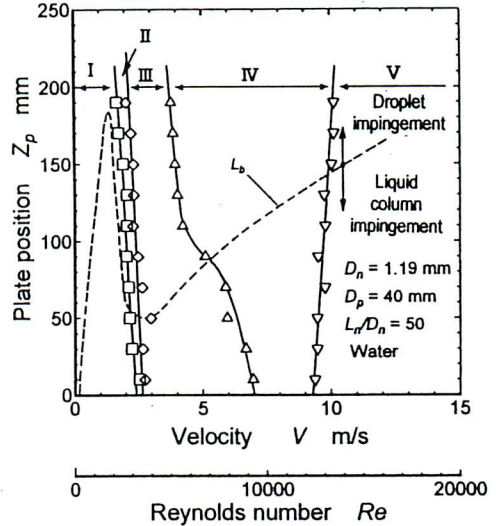


Fig.4 Breakup length and impingement behavior ($D_p=40\text{mm}$)

た厚い液膜の表面に噴流は衝突して、衝突板に直接は衝突していない。ここからさらに初速度を上げていくと液体噴流が衝突板まで到達し、噴流と衝突板の直接衝突が開始され液滴の飛散が始まる。このとき、リムの半径 R_h は広がっていき跳水現象を伴う領域III

$$D_n = 1.19 \text{ mm} \quad L_n/D_n = 50 \quad D_p = 40 \text{ mm} \quad z_p = 30 \text{ mm}$$

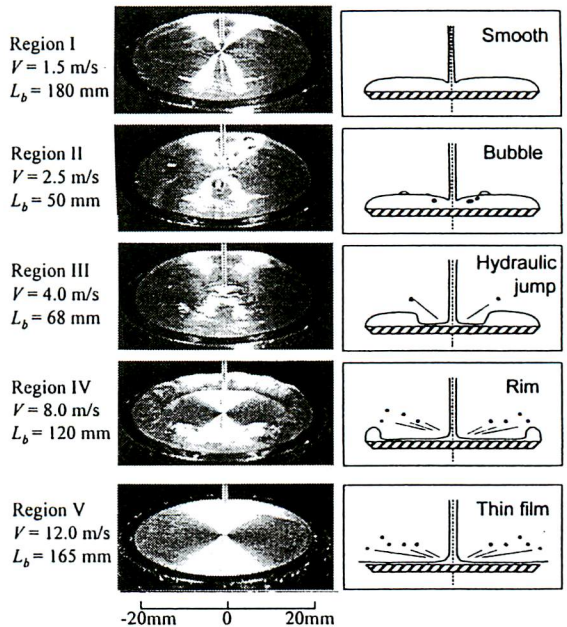


Fig.5 Photographs and sketches of impingement jets at $Z_p=30\text{mm}$

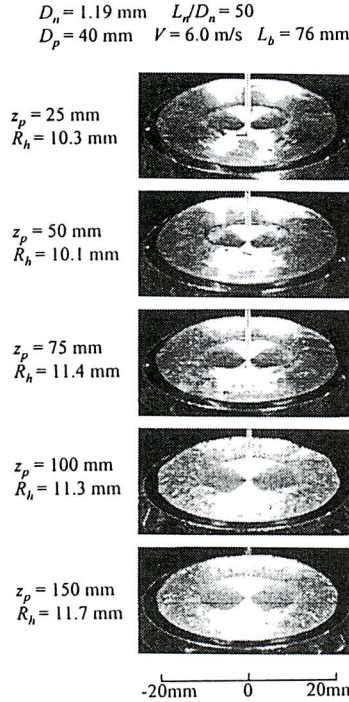


Fig.6 Photographs of impingement jets at various z_p

となる。さらに初速度が増加すると W_{max} は徐々に低くなり、 R_h は衝突板の縁部まで広がっていく領域IVとなる。この領域では縁部の表面張力によって R_h は維持されるが、さらに初速度が増加するとリムはなくなり、衝突板上に薄い液膜のみが形成される領域Vとなる。

液体噴流の特性が分裂の前後により異なるため分裂点の前後における衝突形態を観測した。液体噴流の初速度を $V=6\text{m/s}$ で一定とし、 z_p を変えた場合の結果を図6に示す。液体噴流が分裂を生じ始める $z_p = 75\text{mm}$ 付近からリムの液膜の乱れが激しくなるような挙動が生じており、液膜の挙動は液体噴流の分裂の有無に影響を受けていることが分かる。この場合、 z_p が 150mm のところでも重力の影響は最大 1.7m/s の速度増加を与えるに過ぎず、分裂前後の影響の方が支配的であることが言える。

$D_p=60\text{mm}$ における液体噴流の基本的な特性である分裂長さや液膜の挙動を調べた結果を図7に示す。ここでも図4で示したような5つの領域が存在する結果となった。衝突板の直径が変わっても領域Iから領域IIまでの挙動は変わらないが、領域IIIは広がり領域IVと領域Vは高速側に移動する。これは、衝突板の直径が広がることによってリム部の液膜の挙動が変わるためである。逆に領域I - II, II - IIIの区分については衝突板の直径の影響がないと言える。

3. 2 衝突挙動と衝突板の直径の関係

次に、各初速度においてノズルから衝突板までの距離 z_p を変えた場合の飛散率の特性を調べた。 $D_p=40\text{mm}$ の場合の結果を図8に示す。初速度の増加とともに衝突エネルギーも増加するので初速度に比例して飛散率も増加する。 $V=3\text{m/s}$ と 6m/s の場合は跳水現象が生じている領域IIIである。また、 $V=9\text{m/s}$ は領域IV、 $V=12\text{m/s}$ は領域Vの条件であるが、速度より衝突距離の増加による飛散率の増加が著しい。

衝突板の直径を $D_p=60\text{mm}$ とした場合の結果を図9

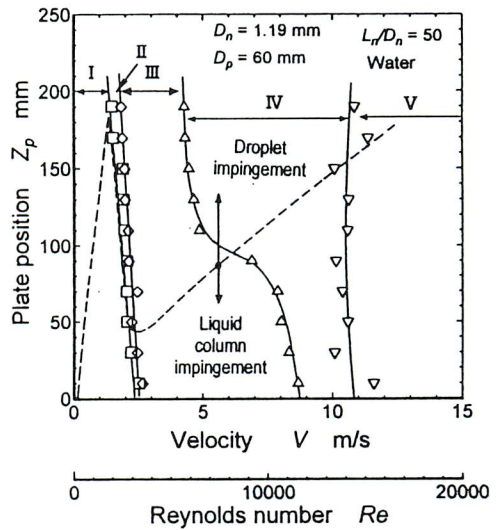


Fig.7 Breakup length and impingement behavior ($D_p=60\text{mm}$)

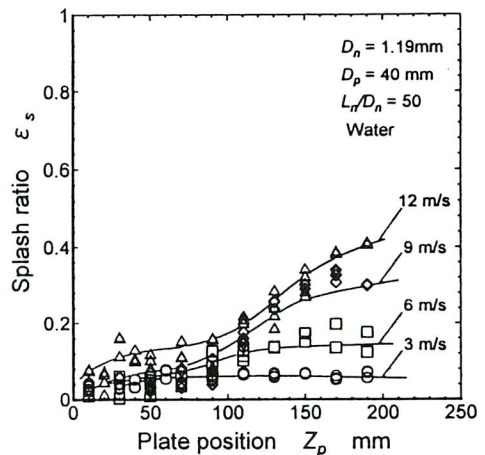


Fig.8 Effect of jet velocity on splash ratio ($D_p=40\text{mm}$)

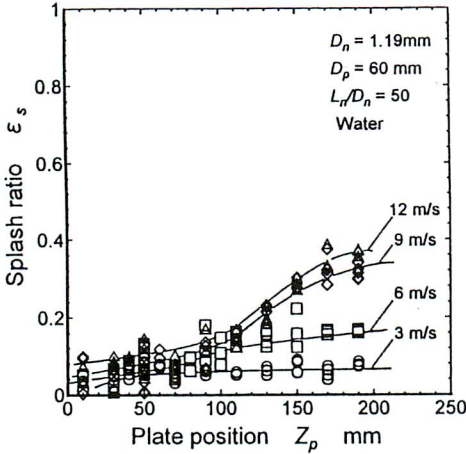


Fig.9 Effect of jet velocity on splash ratio
($D_p=60\text{mm}$)

に示す. 衝突板の直径が 40mm の図 8 の結果と比較しても, 全体的にはその差がほとんどなく衝突板の直径による影響がない結果が得られた. すなわち, 前述したように領域 III, IV, V の区分は衝突板の大きさにより変化するがそこでの飛散率は変化していない. いずれの場合でも液体噴流が直接衝突板に衝突していて, そこに薄い液膜が形成されているが, そのような衝突点近傍の現象が飛散率を支配していることをこの結果は示している.

3. 3 液膜の挙動と飛散量

ノズルから衝突板までの距離を各初速度での分裂長さに設定し, 衝突板上の液膜の挙動を調べた結果を図 10 に示す. 液体噴流の初速度を上げていくと W_{max} は

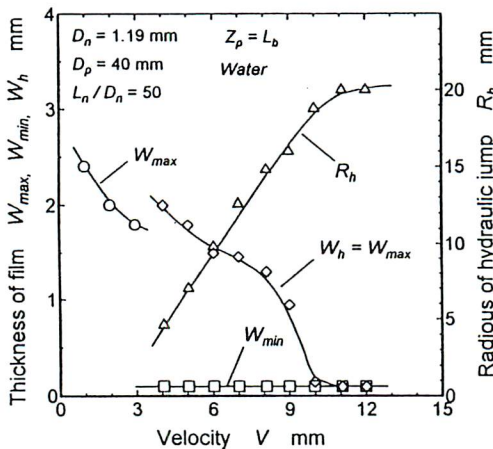


Fig.10 Thickness of film and radius of hydraulic jump at
 $Z_p=L_b$

徐々に低くなる. さらに初速度を上げると液体噴流が衝突板にまで到達し, 衝突板上に薄い液膜 W_{min} が形成され跳水現象が出現する. そのでは液体噴流の初速度に比例して R_h は広がっていき, この場合は初速度 $V=11\text{m/s}$ 付近で衝突板の縁にまで到達し, 衝突板の外径と一致する. リムの高さ W_h も初速度の増加に伴い低くなり最終的には衝突板上に形成された液膜と一致する.

図 11 に初速度 $V=3\text{m/s}$ で一定とし衝突距離を変えた場合のリムの半径と飛散量の関係を示す. 図 10 に示した通り $Z_p=L_b(45\text{mm})$ では安定したリムはできず R_h の計測は行なえなかったが距離を変えると R_h の計測を行なうことができる. これはこの初速度の条件が分裂長さが最短となる波状噴流の開始点にあたるのが原因

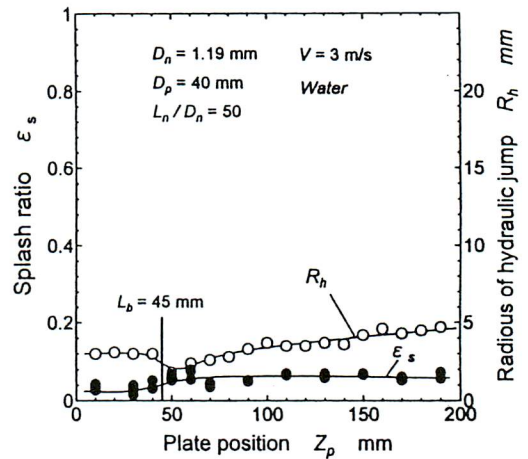


Fig.11 Splash ratio and hydraulic jump at various position
($V=3\text{m/s}$)

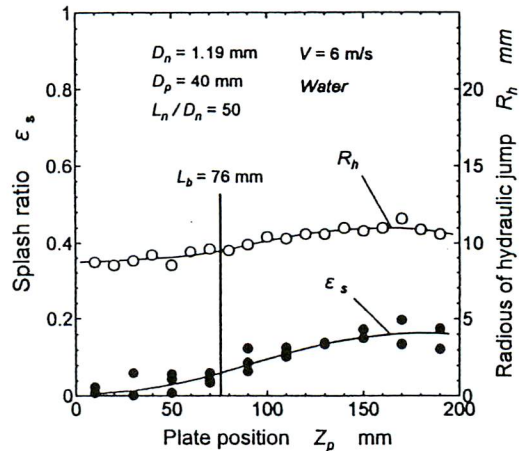


Fig.12 Splash ratio and hydraulic jump at various position
($V=6\text{m/s}$)

である。リムの半径 R_n は分裂前の衝突では一定(3mm)であるが分裂後はわずかに増加の傾向を示す。また分裂の前よりも分裂後の方が飛散量は増えている。図 12 は $V=6\text{m/s}$ の場合である。この場合リムの半径および飛散率の両者とも衝突位置が分裂点から下流に離れるに従い増加している。噴流の持つ運動エネルギーの総量は分裂前後で変わらないからこれは液体噴流の持つ表面エネルギーの大小で解釈すべきである。すなわち、分裂により液滴群となると衝突時の乱れも増大し、その結果飛散量が多くなる。またリムが広がる原因としては、重力の影響による実質的な衝突速度の増加が考えられる。

3. 4 分裂長さと飛散量の関係

液体噴流の挙動が分裂を前後にして異なるため、各噴流の分裂長さを L_b とし、 $0.5L_b$, L_b , $1.5L_b$ のところに衝突板を置き、飛散量を測定した結果を図 13 に示す。いずれの場合でも、飛散率は初速度の増加とともに増加している。また、層流噴流の場合は領域 I および領域 II の衝突であるがわずかの液の飛散が認められる。飛散率が急激に増加する現象は領域 II-III の境界ではなく、領域 III-IV の境界付近から認められる。図 10 を参照しながら調べると衝突位置を $Z_p=L_b$ とした場合、 W_h が薄い液膜の高さ W_{mn} と一致する $V=11\text{m/s}$ 付近からは飛散率の増加が見られない。また、液体噴流が分裂する前の条件である $Z_p=0.5L_b$ の場合では、 W_h が急激に減少する $V=9\text{m/s}$ 付近からは飛散率の増加が見られない。さらに、液体噴流が分裂した後の条件である $Z_p=1.5L_b$ では、初速度の低い領域から飛散率が高くなった。全体的に分裂する前より分裂した後の条件で飛散

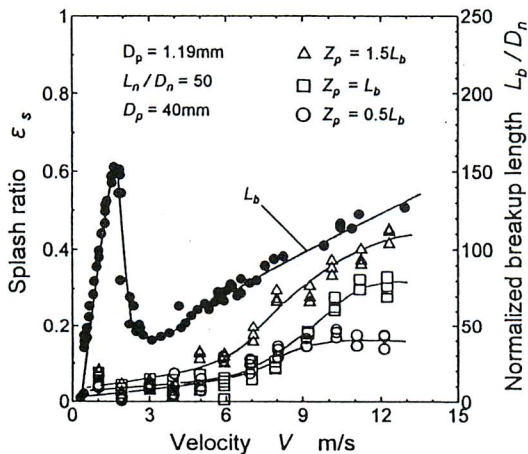


Fig. 13 Relationship between breakup length and splash ratio

量が高くなった。分裂前後での重力による液体噴流の増速は大きくても 1m/s 程度であるので、この結果は速度の違いよりも分裂前後での噴流特性の相異に基づくものと考えられる。すなわち、液体噴流の変形の程度が飛散量に大きく影響している。

3. 5 ウェーバ数と飛散率の関係

ノズルから噴出した液体噴流において表面の変動はノズルからの距離とともに大きくなり分裂に至る。線形安定性理論によれば表面波の成長特性はノズルからの距離に対して指数関数的に増加し、噴流直径を代表長さとするウェーバ数、

$$We = v \sqrt{\frac{\rho D_n}{\sigma}} \quad (2)$$

の関数として次式のように与えられる⁽⁷⁾。ただし、 σ は

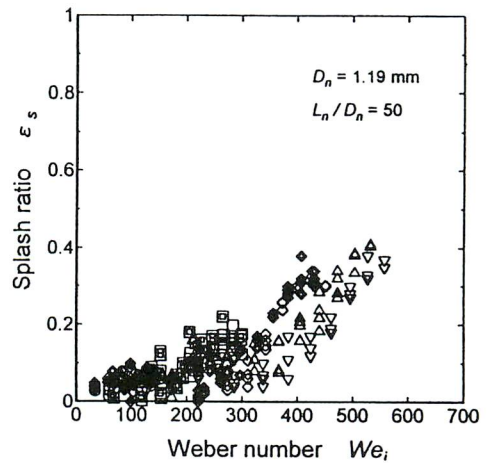


Fig. 14 Relationship between splash ratio and Weber number ($D_p=40\text{mm}$ and 60mm)

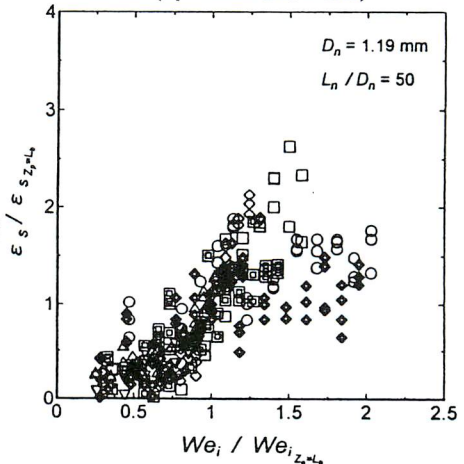


Fig. 15 Non-dimensional relationship between splash ratio and Weber number ($D_p=40\text{mm}$ and 60mm)

液体の表面張力、 ρ は密度である。

$$\frac{A}{D_n} = CWe^2 \exp\left(\frac{C' z_p}{We D_n}\right) \quad (3)$$

ここで、 A は表面波の振幅、 C, C' は実験で定める係数である。Lienhard ら⁽¹⁸⁾ は壁面への衝突点での変動が式 (3) に従うと考えて実験値を整理することを提唱している。しかしながら、表面波の構造にはノズル内の乱流変動の強さなどが強く関与し、必ずしも表面波の振幅が式 (3) のように取り扱えないと考えられる。ここでは、単純に衝突点での変動が噴流のウェーバ数 We と衝突点までの距離 z_p/D_n に関係すると考えて、次式のようなウェーバ数 We_i (ここではこれを衝突ウェーバ数と呼ぶ) を定義して、実験データの整理を試みる。

$$We_i = We \left(\frac{z_p}{D_n}\right)^m = v \sqrt{\frac{\rho D_n}{\sigma}} \left(\frac{z_p}{D_n}\right)^m \quad (4)$$

また、衝突点までの距離の依存性を表す指数 m については、現段階では十分な整理ができないので、ここではひとまず $m=1/2$ とし、代表長さが z_p となるようにした。図 14 はこの衝突ウェーバ数と飛散率の関係を図 8 と 9 のすべてのデータについてまとめた結果である。飛散率は We_i とともに増加するが、その増加の傾向は $We_i=300$ 付近を境にして異なり、この値を超えると We_i とともに急激に飛散率は増加する。

前述した通り、飛散率は衝突距離が分裂長さにより長くなると急激に増加する。そこで衝突距離が分裂長さに一致する場合の衝突ウェーバ数 $We_{izp=lb}$ とそのときの飛散率 $\epsilon_{szp=lb}$ を基準として種々の速度と衝突位置の噴流について飛散率を無次元化して図 15 に示した。用いたデータは図 14 と同様図 8 と 9 に示したデータである。この図より分裂長さよりも短い距離で衝突する場合では飛散率はそれぞれの条件によらず一様に増加すること、分裂長さよりも長い距離で衝突する場合は分裂点での衝突に比べて 1.5 倍程度の飛散率になる。

4. まとめ

液体噴流が衝突板に衝突する際に形成される液膜の特性と飛散する液滴量などの普遍的な特性を明らかにするためにの実験を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 液体噴流が衝突板に衝突するときの衝突挙動は 5 つの領域に分類される。
- (2) 衝突挙動には衝突板の直径の影響を受けやすい衝突挙動と影響を受けにくい挙動が存在する。
- (3) 層流噴流より乱流噴流の場合の方が飛散量は多

い。

- (4) 乱流噴流の場合、液体噴流の衝突による飛散量は分裂後の衝突の場合が分裂前の衝突の場合より 2 倍程度増加する。

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) Y.Hosho, H.Nakai and T.Kadota, "Transient Fuel Supply Characteristics in a Carburetted SI Engine under Accelerating Conditions", Proc. of Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1985, 91-98.
- 3) P.O.Witze and R.M.Green, "Techniques for Enhancing the Observation of PFI Spray Patterns in a Bench-Top Spray Rig", Proc. of 4th Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1998, 511-516.
- 4) S.Lee et. al, "A Comparison of Fuel Distribution and Combustion During Engine Cold Start for Direct and Port Fuel Injection System", SAE Paper 1999-01-1490.
- 5) T. Kume, et. al. : Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine, SAE Paper 960600, 1996.
- 6) K.Naitoh and Y.Takagi, "Oval-Parabola Trajectories (OPT) Model of Droplet-Wall Interaction in Engine", Proc. of 3rd Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1994, 417-422.
- 7) A.Kakuhou et. al, "LIF Visualization of In-Cylinder Mixture Formation in a Direct-Injection SI Engine", Proc. of 4th Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1998, 305-310.
- 8) T.H. Lake, et, al. : Comparison of Direct Injection Gasoline Combustion Systems, SAE Paper 980154, 1998.
- 9) T.Tanabe, et. al, "Experimental Study on Unsteady Fuel Spray Impinging onto a Projection on a Wall", Proc. of 3rd Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1994, 379-384.
- 10) J.Senda, et. al, "Modeling on Diesel Spray Impinging on Flat Wall", Proc. of 3rd Int. Symp. of Diagnostics

- and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1994, 411-416.
- 11) S.P.Mislevy and P.V.Farrell, "Spray Characteristics of an Impinged Diesel Fuel Spray", Proc. of ICLASS-'97, Vol.1, (1997), 231-238.
 - 12) T.Ebara, K.Amagai and M.Arai, "Movement and Structure of Diesel Spray Impinging on a Inclined Wall", SAE Paper No.970046.
 - 13) T.Ebara, K.Amagai and M.Arai, "Penetration Model of a Diesel Spray along a Wall", Proc. of 4th Int. Symp. of Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 1998, 423-428.
 - 14) J.Senda, et.al, "Modeling Spray Impingement Considering Fuel Film Formation on the Wall", SAE Paper No.970047.
 - 15) A.Saito and K.Kawamura : "Behavior of Fuel Film on a Wall at Fuel Spray Impinging", Proc. of ICLASS-'97, Vol.1, 1997, 54-61.
 - 16) S. Tomas et al., Trans. ASME, J Fluid Eng., Vol.113, 1991, 73-80.
 - 17) J. Stevens and B. W. Webb, Trans. ASME, J Heat Transfer., Vol.114, 1992, 79-84.
 - 18) J. H. Lienhard et. al., Trans. ASME, J Heat Transfer., Vol.114, 1992, 362-372.
 - 19) S. K. Bhunia et. al., Trans. ASME, J Fluid Eng., Vol.116, 1994, 338-344.
 - 20) S. Middleman, Modeling Axisymmetric Flows, Academic Press, 1995.
 - 21) W.Debler and D.Yu, "The Break-up of Laminar Liquid Jet". Proc. R. Soc. Lond. A 415, (1988), 107-119.



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. 0277-30-1523
 Fax. 0277-30-1521
 略歴：1992年 武蔵工業大学
 大学院・修士課程修了
 主として壁面に衝突する液体
 噴流の研究



天谷 賢児
 群馬大学・工学部・助教授
 群馬県桐生市天神町1-5-1
 Tel. 0277-30-1523
 Fax. 0277-30-1521
 略歴：1992年 東北大学大学院
 博士後期課程修了
 主として微粒化のモデリン
 グ, 微粒化機構, 気液二相
 流, プラスチック廃棄物処
 理に関する研究



荻原 五郎
 群馬大学・工学部・技官
 群馬県桐生市天神町1-5-1
 Tel. 0277-30-1524
 Fax. 0277-30-1521
 略歴：1969年 群馬県立桐生
 工業高校
 主として高温燃焼, ディーゼル
 噴霧に関する研究



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
 博士後期課程修了
 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