

傾斜面に衝突する液体噴流の飛散特性

Splashing Phenomena of a Liquid Jet Impinged on an Incline Wall

金 永一, 新井雅隆

(Young-II KIM) (Masataka ARAI)

大川大学 群馬大学

(Daecheon College) (Gunma Univ.)

In the gasoline direct injection engine(GDI) and high speed small diesel engine, it is known that fuel spray impinging on a wall affects engine performance and the exhaust emission characteristic. In this study, the behavior of the impinging fuel spray and fuel splashing on the inclined wall were investigated. Under a short distance between the nozzle and the impingement plate, liquid jet in a smooth region, it does not have an influence upon splash ratio regardless of an impingement angle and an initial velocity. On the other hand, under a condition of a long distance between the nozzle and the impingement plate and gives an incline angle, strong splash was observed.

Key words : Wall impingement, Splash ratio, Incline wall, Thin film diameter

1. まえがき

自動車のエンジンにおいて吸気ポートや燃焼室壁面付近での噴霧挙動は機関の設計や性能に重要な役割をしている⁽¹⁾。特に、ガソリン直接噴射式機関や小型高速型のディーゼル機関などでは、噴射された燃料噴霧はピストンキャビティなどの壁面に衝突し、噴霧液滴と壁面間のさまざまな干渉過程を経て、噴霧液滴群あるいは燃料蒸気は壁面から分散もしくは拡散して燃焼過程を左右する。Warlbergerら⁽²⁾の研究によるとディーゼル機関において高負荷の条件では噴射燃料の50%以上がピストン燃焼室に衝突する。壁面に衝突した噴霧の挙動は燃焼と排気特性に重要な影響を及ぼしており、燃焼室の条件により壁面付近での挙動は異なってくる。燃焼室に衝突する液滴は周囲の空気流

れに影響を受けながら壁面に衝突する。衝突した液滴はより小さい液滴となり分散され、燃料蒸発と混合特性を向上させる役割をする。しかし、衝突面に液膜を形成しながら残る場合は、燃料の壁面堆積により黒煙、未燃炭化水素および燃料消費率を増加させる⁽³⁻⁵⁾。よって、燃料噴霧の壁面挙動を正確に把握することは重要であり、噴霧の衝突挙動を調べる研究は多く行われている⁽⁶⁻⁸⁾。著者らはこれまで、連続噴霧と間欠噴霧を衝突板に垂直に衝突させ、衝突板に形成する液膜の厚さと液滴の飛散率との関係について基本的な特性を調査し報告した^(9,10)。しかし、傾斜面への衝突噴霧を定量的に測定した研究例はほとんど見られない。

そこで、本研究では、液体噴霧が衝突面に任意の角度で衝突する際に形成される液膜の特性と飛散量について定量的に測定したので報告する。

2. 実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。コンプレッサによって加圧された供試燃料は流量計と圧力計により設定流量に合わせられ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に液膜を形成する液体と捕集容器に捕集される液体とに分けられる。衝突板上に残った液膜と、捕集容器に捕集される液体を捕集し天秤でその重量を計り、噴射量との差から飛散率を算出した。噴流が傾斜して衝突板に衝突するようノズルは任意の角度 θ_i で噴出できるような構造とし、衝突板に傾斜して衝突するときの飛散特性を調べた。また、衝突噴霧の巨視的衝突挙動を調べるために、カメラで撮影した。供試液体は蒸留水を、ノズルは噴口直径 D_n が 0.49mm のホールノズルを使用した。衝突距離の影響について調べるためにノズルから衝突板までの距離 Z_p を変更可能とした。

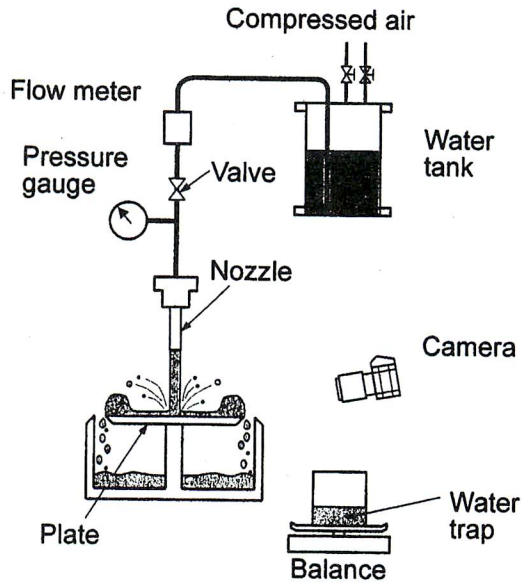


Fig.1 Experimental setup

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 である。 D_p が小さいと液膜の現象の確認がしにくくなる。また、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、適切な飛散率が求めにくくなる。そこで本研究では種々の現象の確認が容易な $D_p = 40\text{mm}$ を使用した。衝突板の縁と捕集容器内径との間を δ_{slit} とし、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。衝突角度 θ_i はノズルと衝突板が直角になるときを 0° とした。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。噴流が衝突板に衝突すると飛散されずに残留する液滴は衝突板上に液膜を形成しながら噴流中心の外側にリムを形成する。リムの内側を D_{fmin} とした。

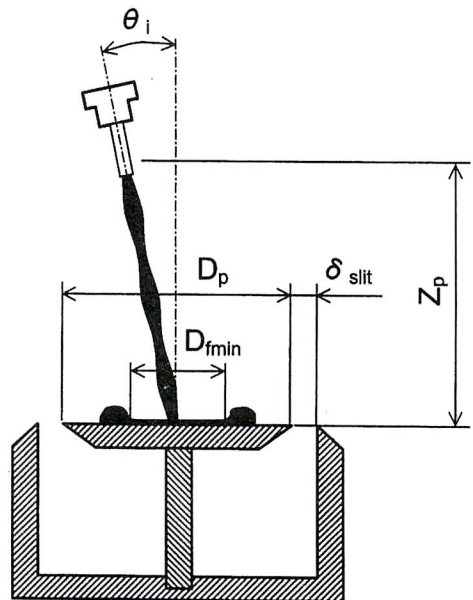


Fig.2 Impingement plate and nozzle

ノズルから噴出された液体噴流は衝突板に衝突した後、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 $\varepsilon_s(t)$ は式(1)によって求めた。図 3 に示すように噴射開始からある時間 t までの全噴射量 $Q_{(total)}(t)$ 、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 $Q_{(sample)}(t)$, $Q_{(splash)}(t)$ は飛散量である。

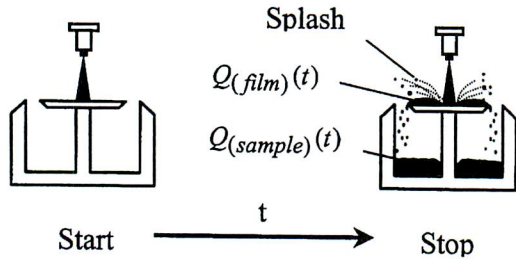


Fig.3 Conceptual figure of Splash ratio

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(t) &= \frac{Q_{(splash)}(t)}{Q_{(total)}(t)} \\ &= \frac{Q_{(total)}(t) - Q_{(film)}(t) - Q_{(sample)}(t)}{Q_{(total)}(t)} \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

3. 衝突角度と飛散特性

図 4 は各液体噴流速度における分裂長さや衝突角度が異なる条件での飛散特性を示している。破線で表示した曲線は分裂長さを表している。分裂長さは噴流の初速度が増加していくとともに長くなり最大値を表した後に急激に減少し、その後再び増加していく典型的な曲線を示している⁽¹¹⁾。噴流速度 $V = 6\text{m/sec}$ 付近の平滑流領域までは衝突角度が飛散率に大きな影響を及ぼしていないが、遷移領域にあたる $V = 6\text{m/sec}$ を超える領域からは衝突角度とともに飛散率も異なってくる。この条件では、ノズル先端と衝突板との距離が $Z_p = 100\text{mm}$ であり、 $V = 6\text{m/sec}$ を超える領域からの液体噴流は分裂して衝突することになる。

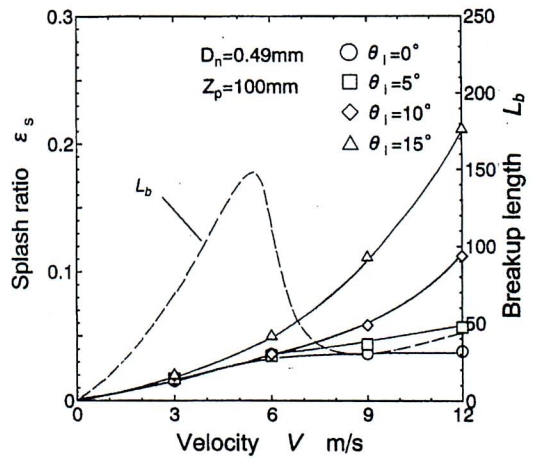


Fig.4 Breakup length and splash ratio behavior

衝突角度を変えた場合の液体噴流の飛散特性を図 5 に示す。平滑流領域である $V = 6\text{m/sec}$ までは初速度による影響はあるものの衝突角度が飛散率に影響を及ぼしていないが、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傾向を示す。なお、遷移領域でありながら衝突角度 θ_i が大きい場合には噴流方向に作用する衝突力の衝突板の面に沿った分力が衝突板と垂直に衝突する場合より大きくなるので衝突板に沿った流れがおきやすく飛散率も比例して増加する。

図 6 に衝突角度を $\theta_i = 0^\circ$ とし衝突距離を変化させたときの飛散特性を示す。いずれもノズルと衝突板との距離 Z_p が大きくなると飛散率も増加していく傾向を示しているものの、その影響は小さく飛散率も大きくない。また、噴霧の初速度の増加に対し飛散率もやや増加するもののその影響はそれほど大きくない。特に、 $V = 3\text{m/sec}$ の平滑流領域では衝突角度も $\theta_i = 0^\circ$ であるため飛散率に衝突距離の影響も現われにくくなっている。

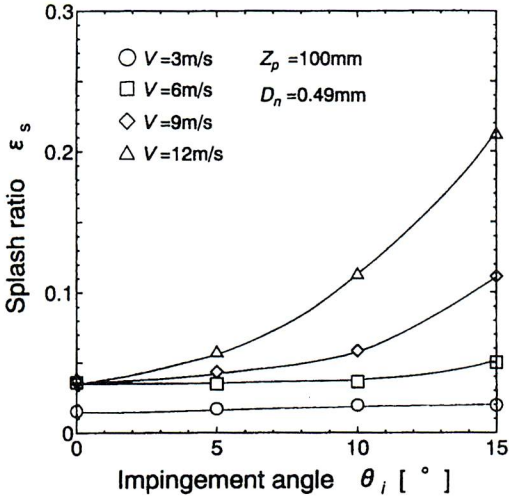


Fig.5 Effect of injection velocity on impingement angle ($Z_p = 100\text{mm}$)

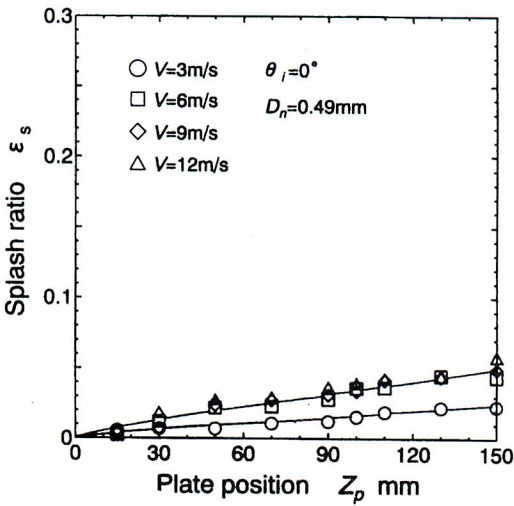


Fig.6 Effect of injection velocity on plate position ($\theta_i = 0^\circ$)

衝突角度を $\theta_i = 15^\circ$ に傾け、衝突距離を変化させたときの飛散特性を図7に示す。初速度 $V = 3\text{m/sec}$ と $V = 6\text{m/sec}$ では平滑流領域であり飛散率は $\theta_i = 0^\circ$ の結果とあまり差がない。初速度 $V = 9\text{m/sec}$ 以上では液体噴流が分裂を始める $Z_p = 50\text{mm}$ 付近から飛散率は急激に増加する。また、単位質量当たりの運動量は初速度に比例し、初速度 $V = 3\text{m/sec}$ に対し $V = 9\text{m/sec}$ では約3倍、 $V = 12\text{m/sec}$ では約4倍になり、液体噴流の発達状態と運動量が飛散率に影響を及ぼしていると考えられる。

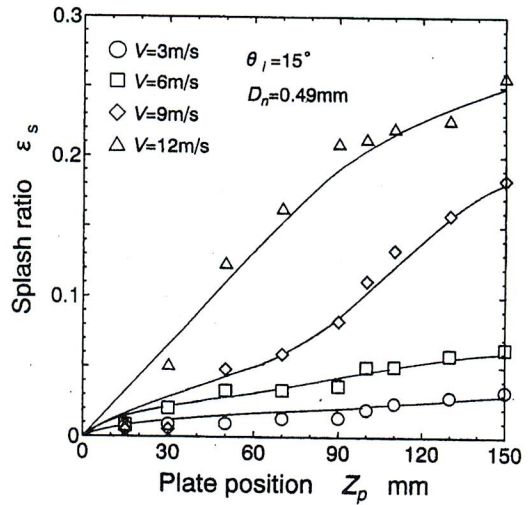


Fig.7 Effect of injection velocity on plate position ($\theta_i = 15^\circ$)

液体噴流の初速度を $V = 12\text{m/sec}$ 、ノズルから衝突板までの衝突距離 $Z_p = 15\text{mm}$ とした場合の噴流の衝突角度と飛散率の関係を図 8 に示す。この条件では、液体噴流が発達する前に衝突板に到達することとなり、衝突板に厚い液膜を形成しやすくなる。そのため、衝突角度と噴流の初速度が飛散率に影響を及ぼしていない結果となった。すなわち、液体噴流が発達しない状態であると厚い液膜に吸収されるため飛散率は増加しない。

図 8 と同一の条件でノズルから衝突板までの衝突距離 $Z_p = 50\text{mm}$ とした場合の飛散特性を図 9 に示す。 $Z_p = 15\text{mm}$ の結果とは異なり、初速度および衝突角度に比例して飛散率が増加する傾向を示している。これは、図 4 で示したようにこの条件では液体噴流に分裂が生じ波状流の状態で衝突する境界領域であるため液体噴流の状態が飛散率に影響を及ぼしていると考えられる。また、衝突角度 $\theta_i = 15^\circ$ の条件で初速度 $V = 6\text{m/sec}$ が $V = 9\text{m/sec}$ と早くなると液体噴流の運動量も約 51% 増加に対し飛散率は約 46% 増加している。しかし、初速度が $V = 9\text{m/sec}$ から $V = 12\text{m/sec}$ と早くなると運動量は約 23% 増加するが飛散率は約 215% も増加する結果となった。これは、初速度が速くなると液体噴流の分裂による液滴群が衝突時に乱れを増大させるからであると考えられる。

4. 衝突によるリム特性

図 10 に示す写真とスケッチはノズルから衝突板までの距離を $Z_p = 100\text{mm}$ とし、各衝突角度において液体噴流が衝突板に衝突するときの形成される液膜の挙動を示したものである。衝突角度 $\theta_i = 0^\circ$ では、液体噴流を中心としたリム状の厚い液膜が衝突板上に形成される。衝突角度 $\theta_i = 5^\circ$ までは衝突板上に形成される液膜の形状が衝突角度 $\theta_i = 0^\circ$ の場合とそれほど差がなく中心部が典型的なクラウン状態となる。これよりさらに衝突角度を $\theta_i = 10^\circ$ と大きくすると衝突板上の液膜は衝突

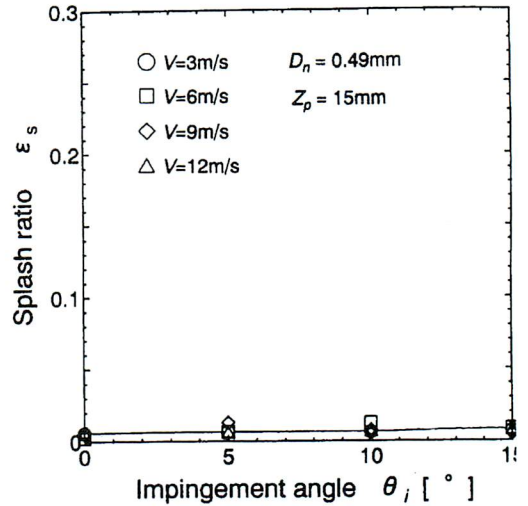


Fig.8 Effect of injection velocity on impingement plate ($Z_p = 15\text{mm}$)

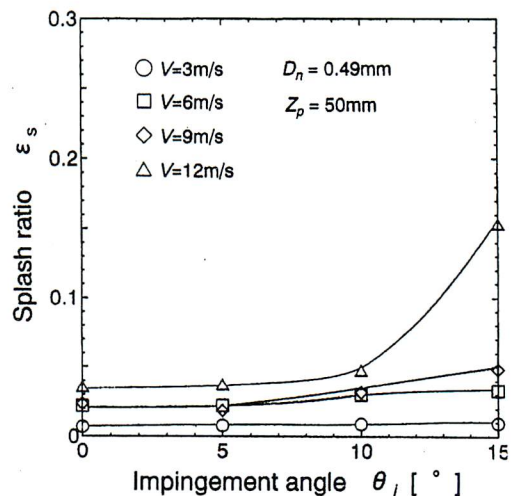


Fig.9 Effect of injection velocity on impingement plate ($Z_p = 50\text{mm}$)

角方向に沿って発達して行き噴射方向と反対側の衝突板には液膜が形成されないところが生じ始める。さらに衝突角度を大きくし $\theta_i = 15^\circ$ とすると、衝突板上の薄い液膜部分が広くなるとともに噴射方向と反対側の衝突板上には液膜が形成されない部分が広がっていく。

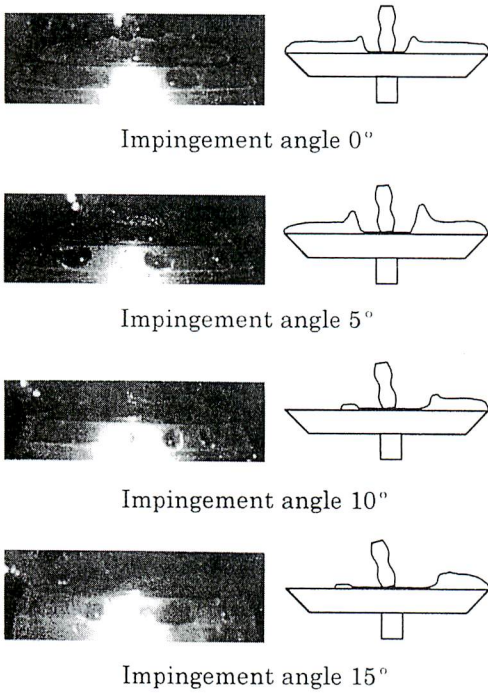


Fig.10 Photographs and sketches of impingement jets at $Z_p=100\text{mm}$ and $V = 12\text{m/sec}$

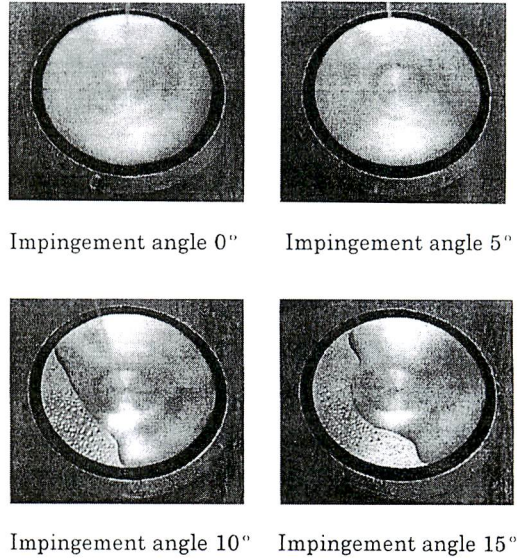


Fig.11 Photographs at $Z_p=100$ and $V = 12\text{m/sec}$

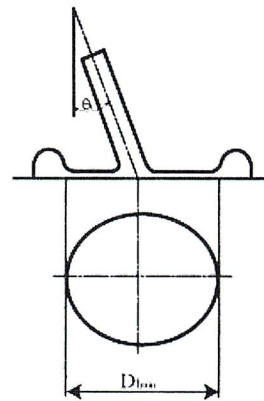


Fig.12 Definition of thin film diameter

図 11 に図 10 と同じ条件で衝突挙動を撮影した写真を示す。衝突角度が大きくなると衝突板中心部のリムが徐々に広がっていくことが確認できる。また、衝突板上に形成される液膜も衝突角度により液膜が片方に偏っていく挙動も確認できる。

図 12 に衝突角度を持つ液体噴流が衝突板に衝突し生じるリム状の代表的な模様を示す。 θ_i は衝突角度とし、 $D_{f, \text{min}}$ は衝突角度方向に形成されるリムの直径である。

図 11 と同様に撮影した写真からリム部分を求め衝突角度とリム直径との関係を図 13 に示す。衝突角度が大きくなるとリム直径も比例して大きくなる。これは、衝突角度が大きくなると衝突板に衝突する液体噴流が下流側方向に発達していくためと考えられる。また、初速度 $V = 6\text{m/sec}$ では衝突角度 $\theta_i = 5^\circ$ 以上になると衝突板上に形成される薄い液膜のリム直径が大きくなるが、初速度 $V = 12\text{m/sec}$ では衝突角度による影響がそれほど大きく影響を及ぼしていない結果となった。すなわち、液体噴流の衝突による飛散率は液体噴流の分裂状態と初速度の影響が衝突角度よりも大きいことが言える。

5. まとめ

ホールノズルによる連続噴流に衝突角度を持たせ衝突板に衝突させた際に形成される液膜の挙動と液体噴流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) 平滑流領域でノズルと衝突板との間隔が短い条件では衝突角度や初速度には関わらず飛散率に影響を及ぼさない。
- (2) ノズルと衝突板との距離が長く、その間に液体噴流が波状流に変化するような場合では液体噴流に衝突角度を与えると飛散率は増加する。

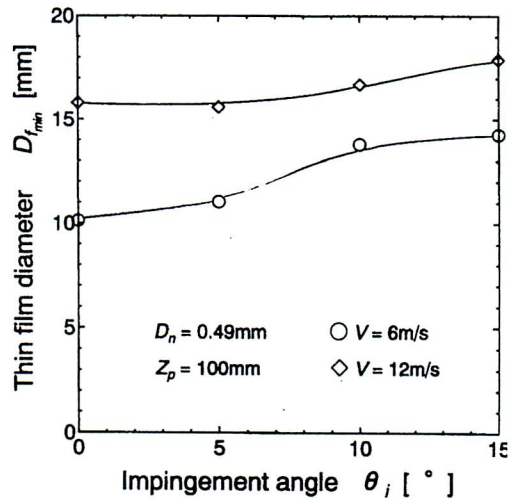


Fig.13 Relationship between impingement and thin film diameter at $Z_p=100\text{mm}$

参考文献

1. W. P. Cartellieri et al, "Status report on a preliminary survey of strategies to meet US-1991 HD diesel emission standards without exhaust gas after treatment", SAE Paper 870343, 1987.
2. P. 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. H. Tsunemoto and H. Ishitani, "The behavior of impinged fuel sprays on simulated combustion chamber walls in direct injection diesel engine", JSAE Review, Vol. 3, 1982.
6. 金・ほか3名, "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.
7. J.Geiger et al, "Direct injection gasoline engines-combustion and design", SAE Paper 1999-01-0170, 1999.
8. 常本・ほか3名, "ホールノズルにおける壁面衝突噴霧の発達過程", 自動車技術会論文集, 9634521, Vol.27, No.2, pp.39-45, 1996.
9. Y. I. KIM and Masataka ARAI, "Droplets splash related with a wall impingement of liquid jet", Proc. of ICLASS-2000, pp.594-599.
10. 金, 新井, "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
11. S. Middleman, Modeling Axisymmetric Flows, Academic Press, 1995.



金 永一
 大川大学・自動車機械学部
 韓国忠南周捕面館山里 6-7
 Tel. Fax. 041-939-3066
 略歴: 2003年 群馬大学
 大学院・博士後期課程中退
 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・高重力場での熱
 伝達, 高温燃焼に関する研究