



高温高圧雰囲気下におけるガソリン噴霧の壁面衝突挙動と液膜形成

Wall Impingement Behavior and Liquid Film Formation of Gasoline Spray Impinging under High-Temperature and High-Pressure Ambient Conditions

内富 真太郎, (Shintaro UCHITOMI) 東ソー株式会社 (Tosoh Corp.)	駱 洪亮, (Hong Liang LUO) 広島大学大学院 (Hiroshima Univ.)	西田 恵哉*, (Keiya NISHIDA) 広島大学 (Hiroshima Univ.)	尾形 陽一, (Yoichi OGATA) 広島大学 (Hiroshima Univ.)
張 武, (Wu ZHANG) マツダ株式会社 (Mazda Motor Corp.)	藤川 竜也, (Tatsuya FUJIKAWA) マツダ株式会社 (Mazda Motor Corp.)	原 亮介 (Ryosuke HARA) マツダ株式会社 (Mazda Motor Corp.)	

The recent strict regulation of emission for internal combustion engines requires the reduction of pollutant emissions such as soot. The direct-injection spark-ignition (DISI) engine, which has been widely used for passenger cars, can improve thermal efficiency and reduce the emission of carbon dioxide. However, as fuel is injected directly into the cylinder, it is difficult to avoid the wall impingement of spray on the combustion chamber. And liquid films inevitably form on the piston and cylinder surfaces. These films are possible sources of unburnt hydrocarbons and soot emissions. In addition, liquid films have a significant influence on combustion efficiency. To improve the combustion performance of DISI engines, better understandings of the spray-wall interaction and liquid film formation processes are needed. This work investigated the wall impingement and liquid film formation by sprays injected from a mini-sac injector with a single-hole. The experiments were conducted in a constant-volume vessel under various ambient pressure and temperature. A quartz glass with rough surface was used as the flat wall. The refractive index matching (RIM) technique was applied to investigate the spatial distribution and formation process of liquid films. The results showed that the adhered liquid mass and spatial distribution of liquid films, liquid film formation process are affected by the ambient pressure and temperature. In particular, the effect of ambient temperature on liquid film formation is significant. The results of RIM method provided insights into the effects of ambient conditions on the wall impingement behavior and liquid film formation processes.

Keywords: Gasoline Engine, Direct Injection Fuel Spray, Wall Impingement, Fuel Film Thickness, Refractive Index Matching

1. 緒言

ガソリンエンジンにおいて、燃料の直噴化は熱効率、出力性能の向上に大きく貢献する。直噴エンジンでは、燃焼室壁面への燃料噴霧の衝突が生じる。燃料噴霧の壁面衝突は、暖機運転時の着火不安定性、燃料液滴や壁面上の燃料液膜に起因するすすなどの有害物質の排出といった問題の原因となる⁽¹⁾。一方で近年、排気ガス規制においてはPMおよびPNに対する規制が厳しくなっている⁽²⁾。これらの問題に対応するため、燃料噴霧の壁面衝突挙動およびその際に生じる液膜形成過程を明らかにすることが重要となる。

燃料噴霧の壁面衝突挙動を解明するための基礎研究として、単一液滴による研究が行われてきた。それらの実験結果をもとに燃料噴霧の壁面衝突モデルがいくつか提案され、シミュレーションに用いられている。しかし、噴霧液滴間の干渉などの影響により、燃料噴霧の壁面衝突および液膜形成を正確に計算するには至っていない⁽³⁾。

燃料噴霧の発達と液膜形成には雰囲気条件が大きく影響する。一般的に、高圧雰囲気は燃料噴霧の微粒化を促進させ、高温雰囲気は燃料噴霧および燃料液膜の蒸発を促進させる。直噴ガソリンエンジンでは燃焼モードによって雰囲気条件が大きく変化

するため、様々な雰囲気条件の下での計測が必要となる。

本研究では、燃料噴霧の壁面衝突挙動を明らかにするため、燃料噴霧の壁面衝突挙動およびその際に生成される燃料液膜の計測を、種々の雰囲気条件の下で行った。

2. 実験方法

2.1 燃料噴霧の計測

図1に燃料噴霧の計測に用いた計測装置を示す。計測は定容容器内部に設置された噴射ノズルより燃料を噴射して行った。光源としてキセノンランプ(ウシオ電機株式会社, SX-UID501XAMQ)を用いて燃料噴霧を照射し、燃料噴霧液滴からの散乱光を高速度カメラ(Photron Co., FASTCAM SA-Z)によって撮影した。なお、高速度カメラの撮影速度は20,000 fps、露光時間は49.00 μ sとした。高速度カメラおよび噴射ノズルはデジタルディレイジェネレータ(Stanford Research System, Inc., DG535)によって撮影および噴射タイミングを制御した。

衝突壁面は定容容器内に設置されており、図2に示すように燃料噴霧と壁面の角度 θ は45度、インジェクタ先端からの距離Dは噴霧軸に沿って22 mmとした。後述のRIM法による計測に必要であることから、衝突板として石英のすりガラス(シグマ光機株式会社, DFSQ1-50CO2-60)を用いた。

原稿受付: 2018年5月18日

* 責任著者: 正会員, 広島大学

(〒739-8527 広島県東広島市鏡山一丁目4番1号)

E-mail: nishida@hiroshima-u.ac.jp

2.2 RIM法による燃料液膜の計測

2.2.1 RIM法の基礎原理

本研究ではRIM(Refractive Index Matching)法を用いて燃料液膜厚さの計測を行った。RIM法では片面に粗面をもつすりガラス板を衝突板として使用する。すりガラスの粗面上では、ガラス素材と周囲気体との屈折率の違いにより入射光が拡散反射される⁽⁴⁾。粗面上に燃料液膜が存在するとき、燃料が局所的に平らな面を形成することにより、みかけの粗さが小さくなり散乱光強度が減少する。ただし、燃料とガラス素材との屈折率が一致していることが必要となる。粗面からの散乱光強度の変化率 ΔI は以下のように表される。

$$\Delta I = \frac{I_{dry}(x, y) - I_{wet}(x, y)}{I_{dry}(x, y)} \quad (1)$$

ここで、 I_{dry} 、 I_{wet} はそれぞれ、液膜が存在しないとき、存在するときの空間座標 (x, y) におけるすりガラスからの散乱光強度である。上式で表される散乱光強度の変化率 ΔI は燃料液膜厚さ h と相関があり⁽⁴⁾、以下のように表される。

$$h(x, y) = f(\Delta I) \quad (2)$$

2.2.2 燃料液膜計測のための実験装置

図3に燃料液膜の計測に用いた計測装置を示す。定容容器内において燃料噴霧をすりガラスに衝突させ、すりガラス上に生成される燃料液膜を計測した。光源としてキセノンランプを用いてすりガラスを照射し、すりガラス粗面からの散乱光を、すりガラス下方に設置したミラーを通して高速度カメラによって撮影した。照射光をすりガラスの底面から入射させるために、キセノンランプ光源に傾きをもたせて照射した。なお、高速度カメラの撮影速度は10,000 fps、露光時間は98.75 μ sとした。

2.2.3 液膜厚さの較正

RIM法において、式(2)で表される液膜厚さと散乱光強度との関係を求めるため、較正を行った。較正はMaligneら⁽⁴⁾、Zhengら⁽⁵⁾の方法を参考に、大気圧、室温雰囲気下で行った。また、較正の際の実験装置は図3と同様である。以下に較正の手順を示す。

既知体積の燃料をシリンジによってすりガラス上に滴下し、カメラによって撮影する。滴下された燃料はすりガラス上に広がり、液膜を形成する。このときの液膜面積と滴下体積より平均化された液膜厚さを求め、散乱光強度の変化 ΔI との相関を求める。

較正燃料にはトルエンとトリデカンの混合燃料を用いた。トルエンは壁面上に広がりやすく、薄い液膜が得られるが揮発性が高く数秒で蒸発するため計測が困難である。一方、トリデカンは揮発性が低く計測が容易であるが、厚い液膜が形成される。また、RIM法の原理上、散乱光強度の変化のみによって液膜厚さを計測するため、トルエン、石英と屈折率が同程度ならば液膜厚さの計測には影響を及ぼさない。よって、これらの混合燃料を用いることで薄い液膜を形成しつつ、計測を可能とした。なお、表1に示すように石英およびトルエン、トリデカンの屈折率は同程度である。較正に用いるタイミングはトルエンが完全に蒸発した時点とし、トリデカンの液膜を計測対象とした。

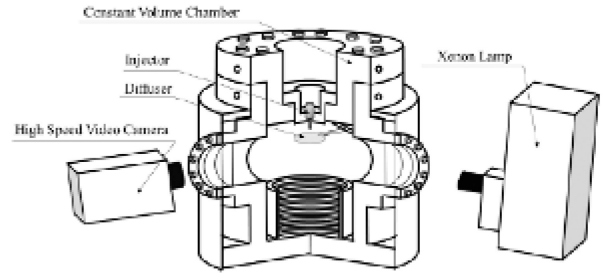


Fig.1 Schematic of Mie scattering measurement setup

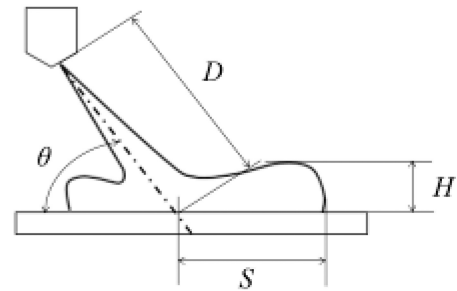


Fig.2 Impingement condition

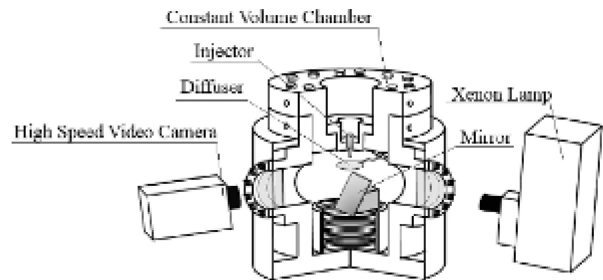


Fig.3 Schematic of RIM experiment setup

Table 1 Characteristics of fuel and quartz

	Refractive Index	Density (kg/m ³)	Boiling Point (°C)	Kinematic Viscosity (10 ⁻⁶ m ² /s ⁻¹)	Surface Tension (N/m)
Toluene	1.49	866	110.6	0.68	0.0285
Tridecane	1.43	756	235.4	2.35	0.0303
Quartz	1.46	-	-	-	-

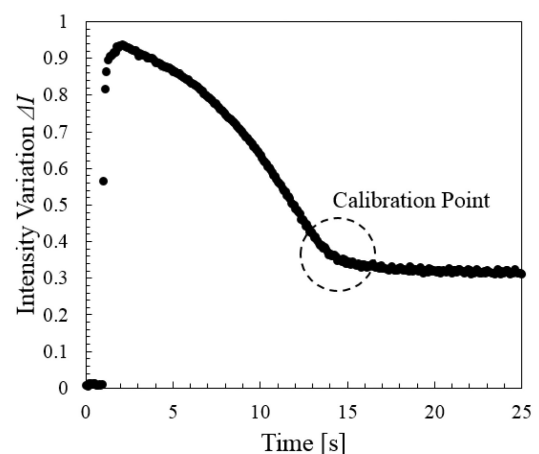


Fig.4 Temporal evolution averaged ΔI (Dripped volume: 0.4 μ l)

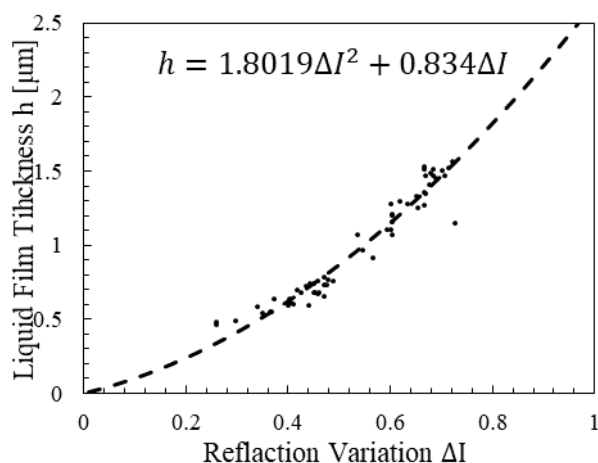


Fig. 5 Calibration curve for RIM experiment

Table 2 Experimental conditions

Injection Conditions	
Injector type	Single-hole
Nozzle hole diameter	0.155 mm
Fuel	Toluene
Injection mass	4 mg
Injection pressure: P_i	10, 20, 30 MPa
Injection duration	2.9, 2.1, 1.7 msec
Ambient Conditions	
Ambient gas	Nitrogen
Ambient temperature: T_a	298, 433 K
Ambient density: ρ_a	1.1, 5.7 kg/m ³
Impingement Condition	
Distance: D	22 mm
Angle: θ	45 deg

較正タイミングは図 4 に示す散乱光強度 ΔI の時間変化より、 ΔI の減少曲線が変曲する点とした。

本研究で得られた RIM 法による液膜厚さ計測のための較正曲線を図 5 に示す。

2.3 実験条件

表 2 に実験条件を示す。供試ノズルとして噴孔径 0.155 mm の単噴孔ホールタイプノズルを用い、供試燃料としてトルエンを噴射した。噴射圧力 P_i は 10, 20, 30 MPa とした。噴射圧力ごとに噴射パルスを変更し、噴射量を 4 mg で一定とした。そのときの噴射期間はそれぞれ 2.9, 2.1, 1.7 ms であり、噴射圧力の上昇により噴射期間が短くなる。

定容容器内は窒素ガスで満たされ、容器底部に設置されたカンタル線ヒーターを用いて雰囲気を加熱した。また、雰囲気温度は石英すりガラス近傍に設置した熱電対及び燃料噴霧が噴射される領域付近に設置した熱電対により測定し、それらが一致

している条件のもとで計測を行った。よって、石英すりガラス周囲は雰囲気温度となる。非定常熱伝達の計算により、常温の石英すりガラスが雰囲気温度と同等の温度となる時間を概算し、その時間、石英すりガラスを雰囲気に曝した。よって、石英すりガラスの温度は雰囲気温度と同等と考える。雰囲気温度 T_a は室温条件として 298 K、高温条件として 433 K とし、雰囲気密度 ρ_a は雰囲気温度によらず 1.1 kg/m³、5.7 kg/m³ とした。

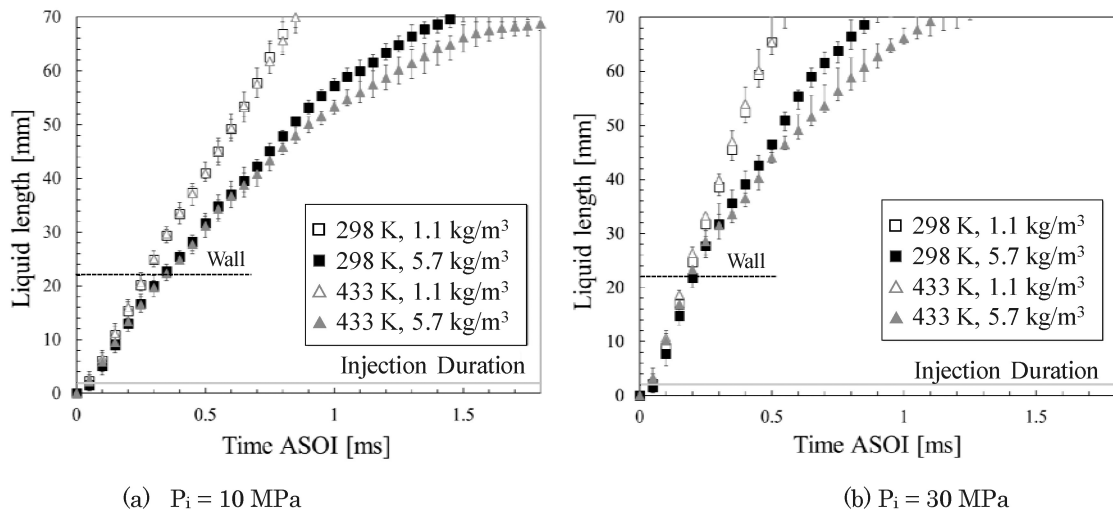
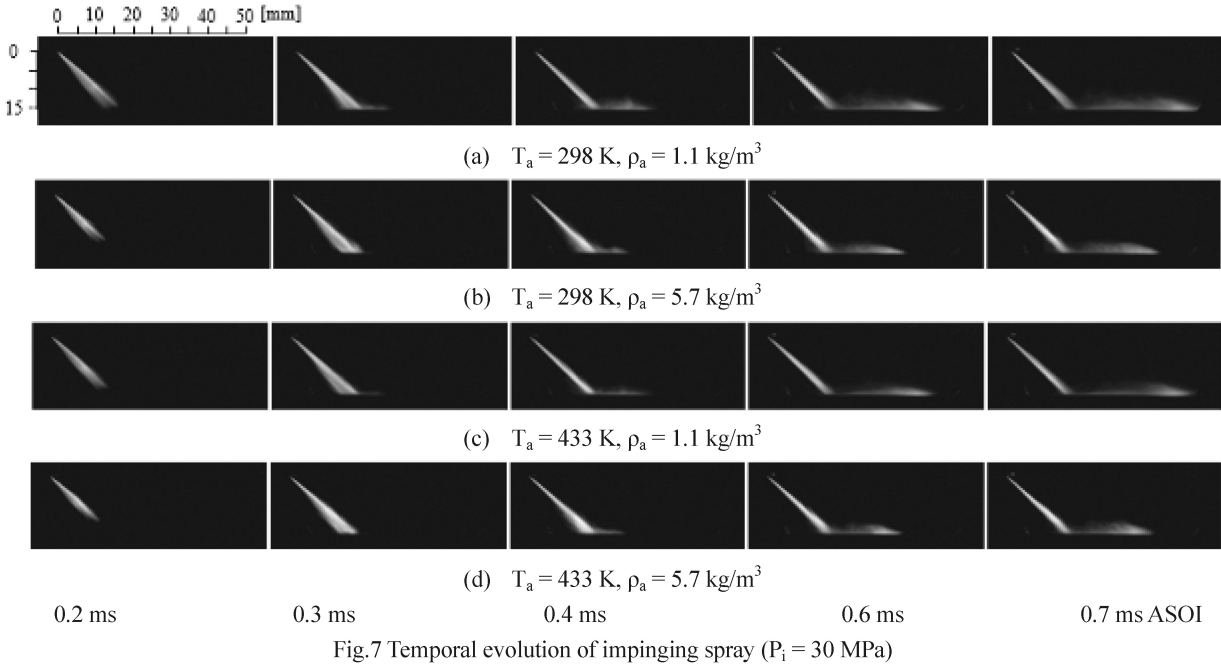
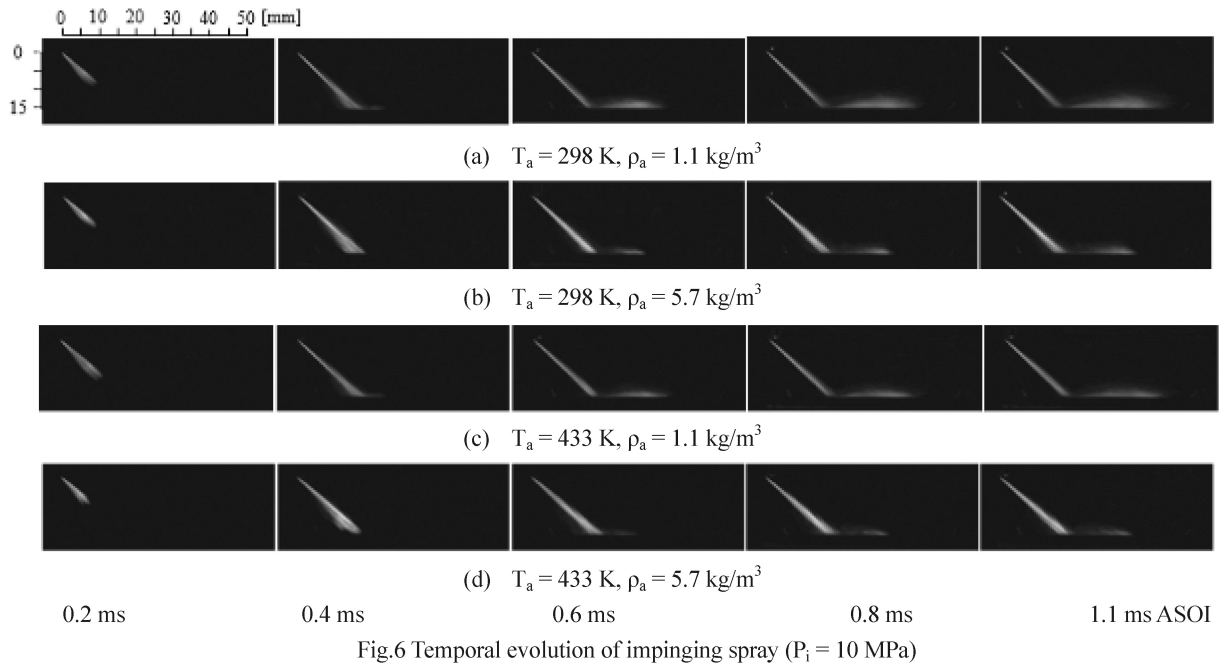
3. 実験結果および考察

3.1 噴霧先端到達距離および衝突後の噴霧高さ

図 6 に噴霧液滴の散乱光撮影によって得られた燃料噴霧の壁面衝突挙動を示す。噴射圧力 P_i は 10 MPa で、雰囲気温度および雰囲気密度を変化させた。壁面衝突前の燃料噴霧において、雰囲気密度の上昇により噴霧の分散性が向上する。その後、燃料噴霧は壁面に衝突し、壁面に沿って発達する。雰囲気密度が高い場合、壁面衝突後に飛散する燃料噴霧の高さが小さいことがわかる。これは、雰囲気密度の上昇により燃料噴霧の運動量が雰囲気に移動した結果、壁面衝突時の運動量が小さく、飛散が抑えられると考えられる。また、雰囲気温度の上昇により噴霧外縁部の液滴が蒸発し、衝突噴霧の高さが減少する。これらの雰囲気条件の影響は、図 7 に示す噴射圧力 30 MPa の結果では小さくなる。

図 8 に噴霧液滴の散乱光撮影より得られた噴霧先端到達距離を示す。なお、噴霧先端到達距離の定義は、図 2 におけるノズル先端から壁面までの距離 D と噴霧衝突点から衝突後の噴霧先端までの距離 S との合計である。噴射圧力の上昇により噴霧先端到達距離が大きくなり、その傾き、すなわち噴霧の速度が大きくなる。また、噴射圧力一定の下で雰囲気密度が上昇したとき、噴霧先端の速度が減少する。この傾向は雰囲気温度によらず同一である。また、一定の噴射圧力、雰囲気密度において雰囲気温度が上昇したときの噴霧先端到達距離は、雰囲気密度 1.1 kg/m³ では変化がみられないが雰囲気密度 5.7 kg/m³ では小さくなる。

図 9 に噴霧液滴の散乱光撮影より得られた、燃料噴霧の衝突後の高さを示す。噴霧高さ H の定義は図 2 に示すように、壁面衝突後に巻き上がった噴霧液滴の高さが最大となる点と壁面との距離である。燃料噴霧は壁面衝突により飛散して雰囲気を取り込み、その流動に後続の噴霧液滴が追従するため、噴霧高さは時間の経過に伴い増加していく。噴射圧力 10 MPa のとき、雰囲気密度または雰囲気温度の上昇により噴霧高さが小さくなる。前述のように雰囲気密度が高いときには、周囲気体との運動量交換が盛んになり壁面衝突時の噴霧運動量が小さくなるため、衝突後の噴霧の飛散が抑えられると考えられる。また、雰囲気温度が高いときには噴霧外縁部の液滴が蒸発し噴霧高さが小さくなると考えられる。一方、噴射圧力 30 MPa のときには衝突初期において同様の傾向がみられるものの、時間経過に伴いその関係が逆転する。これは、雰囲気密度が高い場合には壁面上に浮遊液滴が残存する時間が長いためである。



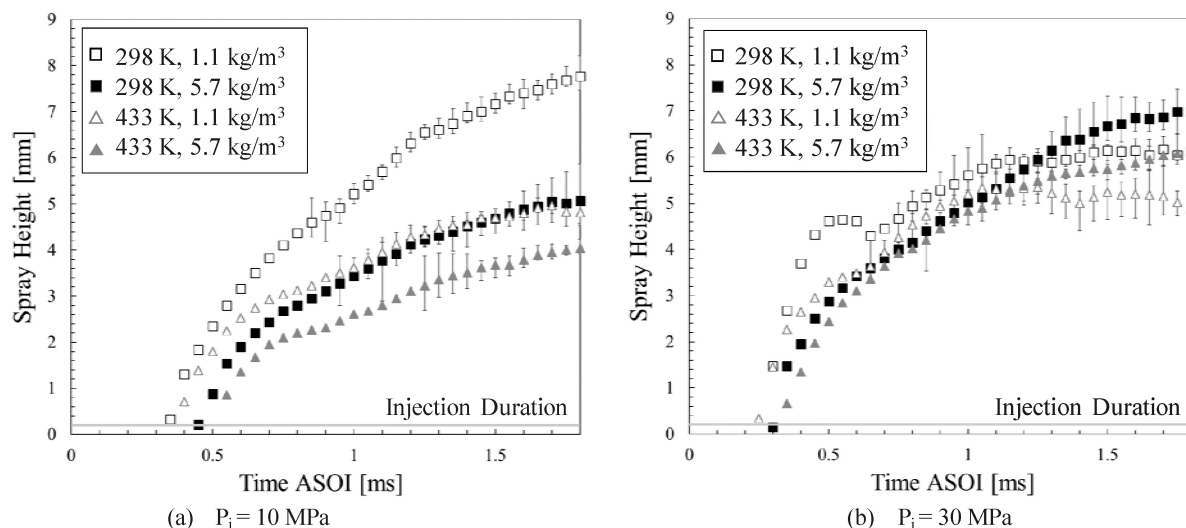


Fig.9 Spray height of impinging spray

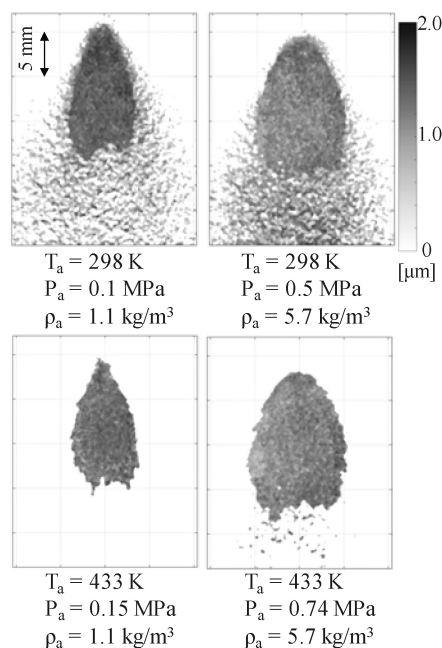
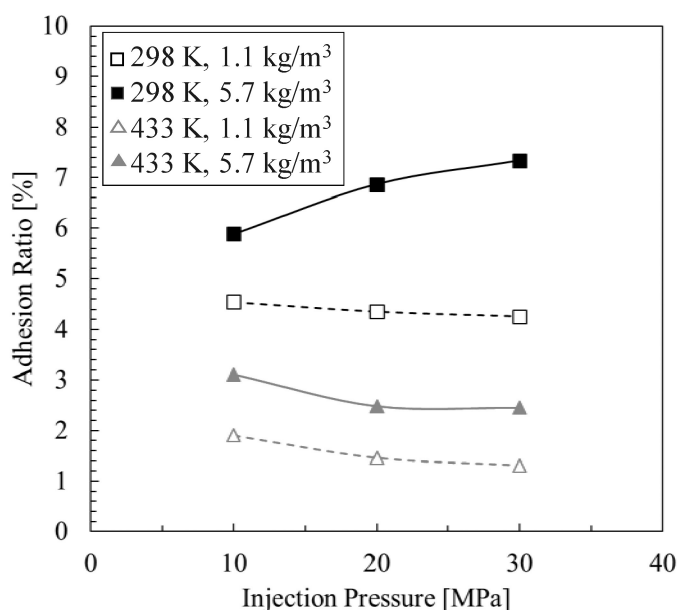
Fig.10 Distribution of adhered liquid film thickness at 0.01 s ASOI ($P_i=10$ MPa)

Fig.11 Adhesion ratio at 0.01 s ASOI

3.2 壁面衝突噴霧による液膜形成

図 10 に燃料噴射開始から 10 ms 後の燃料噴霧の壁面衝突によって形成される燃料液膜の厚さ分布, 図 11 に各雰囲気条件における噴射圧力に対する液膜付着率の変化を示す. 液膜付着率は噴射された全燃料に対する RIM 法によって求められる液膜付着量の割合である. また, 図 10, 11 において, 燃料噴射開始から 10 ms 後を選んだ理由として, 燃料噴射開始から 10 ms よりも前では, 壁面上方空中に浮遊している液滴がランプからの光を散乱することにより, 液膜付着による散乱光の減衰を過少評価してしまうため, その影響が出ない燃料噴射開始から 10 ms を用いた. また, 燃料噴射圧力が異なる場合「燃料噴霧が壁面に衝突してから液膜厚さ計測を実施した時期」は異なるが, 壁

面到達時間が最も早い条件と遅い条件の差は 0.2 ms 以内であり, 図 11 における燃料噴射開始から 10 ms のタイミングにおける付着率への影響はほとんどないと考えられる. 燃料液膜は衝突点の周囲に形成され, 主に下流に広がる. 雰囲気気温度 298 K では液膜厚さ 1 μm 以上の厚い液膜が形成され, その周囲と下流側に薄い液膜が広範囲に付着する. 雰囲気気密度が高くなると液膜厚さの最大値は減少し, 厚い液膜の面積が増加する. 散乱光計測において確認されたように, 雰囲気気密度の上昇は燃料噴霧の分散性を向上させるため, 液膜が広範囲に付着する. 雰囲気気温度 433 K では 298 K 下で観察されたような薄い液膜は観察されず, 厚い液膜の部分のみが観察される. 以上より, 燃料液膜が厚い領域は燃料噴霧の直接衝突および液膜流動により形成され,

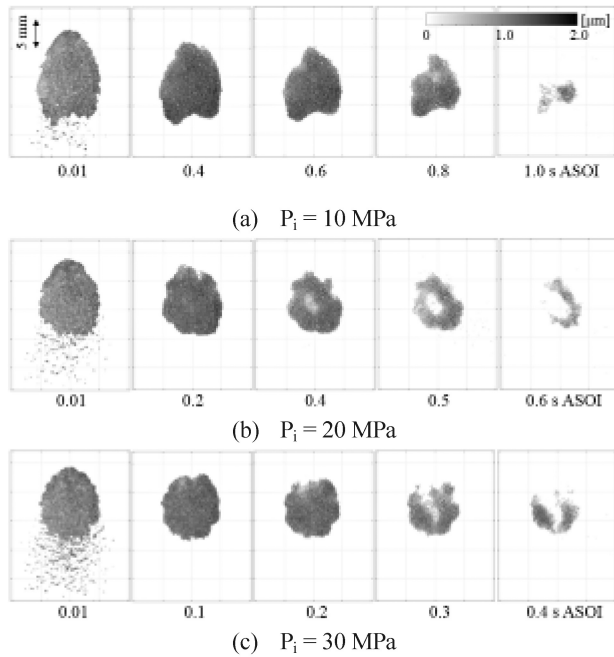


Fig.12 Temporal evolution of adhered liquid film thickness ($T_a = 433 \text{ K}$, $\rho_a = 5.7 \text{ kg/m}^3$)

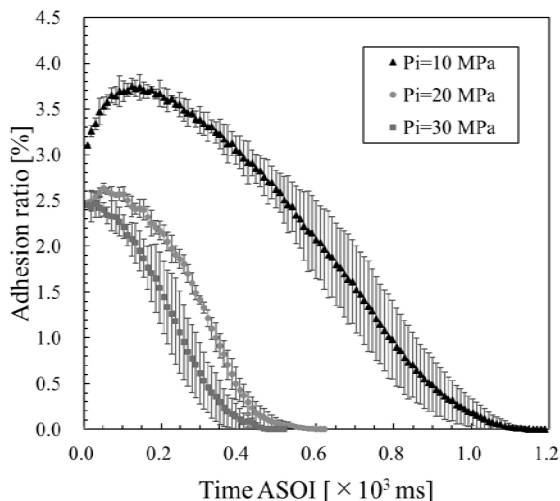


Fig.13 Temporal evolution of adhesion ratio ($T_a = 433 \text{ K}$, $\rho_a = 5.7 \text{ kg/m}^3$)

燃料液膜が薄い領域は衝突後に飛散した噴霧液滴による付着、または液膜流動により液膜が分裂⁽⁸⁾して形成され则认为られる。

本研究における実験条件において、壁面に向けて噴射された燃料のうち1~8%程度が壁面上に付着する。液膜付着率は雰囲気温度の上昇により減少し、雰囲気密度の上昇により増加する。雰囲気温度が高いときには壁面温度が高く、燃料液滴の壁面衝突挙動が変化する⁽⁷⁾可能性がある。そのため、壁面上に液膜が付着しない、または付着した直後に蒸発すると考えられる。雰囲気密度が高いときには噴霧液滴の運動量が減少するため、壁面上に付着しやすくなる。また、噴射圧力の上昇により液膜付着率が減少するが、雰囲気条件 298 K , 5.7 kg/m^3 においてのみ増加した。噴射圧力の上昇により噴霧液滴の運動量は増加する

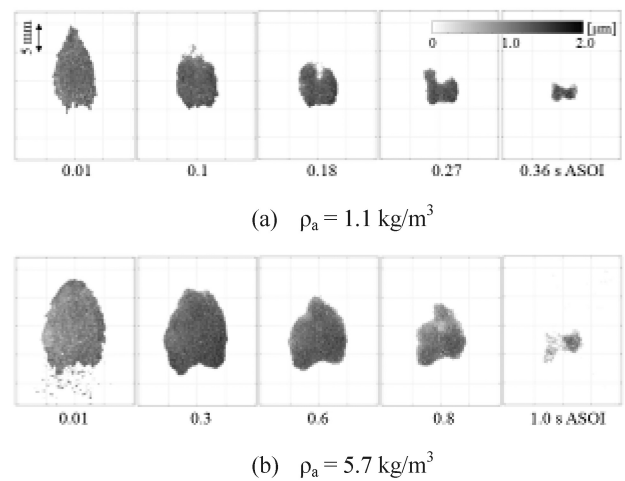


Fig.14 Temporal evolution of adhered liquid film thickness ($P_i = 10 \text{ MPa}$, $T_a = 433 \text{ K}$)

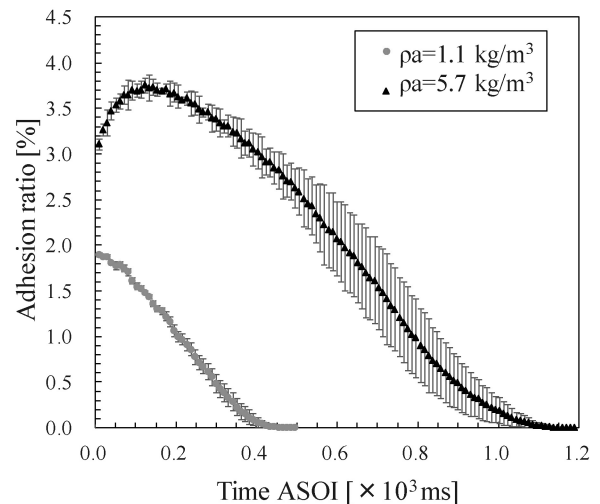


Fig.15 Temporal evolution of adhesion ratio ($P_i = 10 \text{ MPa}$, $T_a = 433 \text{ K}$)

ため、壁面衝突時に飛散しやすくなると考えられる。しかし雰囲気密度が高く、かつ噴射圧力が大きいときには微粒化が促進され、運動量の小さい噴霧液滴が増加し液膜付着率が増加すると思えられる。すなわち、微粒化がある程度まで進むと、燃料噴霧が液膜として付着しやすくなると考えられる。

3.3 燃料液膜の蒸発特性

図12に雰囲気条件 433 K , 5.7 kg/m^3 において噴射圧力を変化させたときの液膜厚さの分布、図13にそのときの液膜付着率の時間変化を示す。噴射圧力が低い場合には燃料液膜厚さの最大値が大きく、液膜面積が大きい。また、噴射圧力が高い場合には液膜厚さが大きい液膜の下流に液膜壁面上に薄い液膜群が形成される。燃料液膜の蒸発速度は噴射圧力 10 MPa において最も小さい。雰囲気条件は同一であるため、蒸発速度の違いは液膜の形状、すなわち厚さや表面積に起因するものであると考えられる。本研究における実験条件では、噴射圧力を 10 MPa から 20 MPa 以上に上昇させたときに液膜付着率が大きく減少し、燃料液膜の寿命時間が小さくなる。この結果より、近年の燃料噴射の高圧力化により液膜付着を低減できると考えられる。

図14に噴射圧力 10 MPa , 雰囲気温度 433 K の条件において雰囲気密度を変化させたときの液膜厚さの分布、図15にそのと

きの液膜付着率の時間変化を示す。雰囲気密度が高いとき、燃料噴霧の分散性向上により液膜の面積が増加する。その結果、液膜付着割合が増加する。また、異なる雰囲気密度において燃料液膜厚さは同程度であるが、燃料液膜の寿命時間は大きく異なる。この結果は前述の液膜形状の影響だけでなく、燃料の飽和温度の影響が大きいと考えられる。雰囲気温度 433 K において雰囲気密度が 1.1, 5.7 kg/m³ のとき、雰囲気圧力は 0.15, 0.74 MPa であり、そのときのトルエンの飽和温度は 383.9, 469.6 K である⁶⁾。したがって、雰囲気密度 1.1 kg/m³ では雰囲気温度がトルエンの飽和温度を超え、トルエンの過熱度は核沸騰領域のオーダーであるため核沸騰の形態をとり蒸発が速く、燃料液膜の寿命時間が短いと考えられる。

4. 結言

本研究ではガソリン噴霧の壁面衝突挙動と液膜形成過程の現象を明らかにすることを目的として、平板に衝突するガソリン噴霧の散乱光撮影および RIM 法による燃料液膜の計測を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 雰囲気密度の上昇により周囲気体との運動量交換が盛んになるため、噴霧の液相到達距離、衝突噴霧の高さは減少し、燃料液膜の付着割合は増加する。
- (2) 雰囲気温度の上昇により高雰囲気密度場における噴霧の液相到達距離が減少する。また、噴霧外縁部の液滴と噴霧液膜が蒸発するため、衝突高さおよび燃料液膜の付着割合は減少する。
- (3) 噴射圧力の上昇により噴霧液滴の運動量が増加するため、噴霧の液相到達距離は増加し、燃料液膜の付着割合は減少する。ただし、室温・高密度雰囲気下では噴霧液滴の微粒化が促進され、運動量の小さい噴霧液滴が増加するため、燃料液膜の付着割合は増加する。

謝辞

本研究の実施にあたり、広島大学大学院博士課程前期の渡部智弘君の協力を得た。ここに付記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) Drake, M.C., Fansler, T.D., Solomon, A.S., Szekely Jr, G.A.: Piston Fuel Films as a Source of Smoke and Hydrocarbon Emissions from a Wall-Controlled Spark-Ignited Direct-Injection Engine, SAE Technical Paper, 2003-01-0547 (2003)
- (2) AVL: Passenger Car Emission Regulations, p12, (2014) <https://www.avl.com/documents/10138/1027860/AVL-Italy+TechDay+-+Light-Duty+Emission+-+2014-10-21b.pdf/da9591d9-3e75-42c2-9157-d7cc9a680b1f>
- (3) Moreira, A.L.N., Morita, A.S., Panão, M.R.: Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful?, Progress in Energy and Combustion Science, 36 (2010), 554-580
- (4) Maligne, D., Bruneaux, G.: Time-Resolved Fuel Film Thickness Measurement for Direct Injection SI Engines Using

Refractive Index Matching, SAE Technical Paper 2011-021-1215 (2011)

- (5) Zheng, Y., Xie, X., Lai, M.C., VanDerWege, B.: Measurement and Simulation of DI Spray Impingements and Film Characteristics, Proceeding of 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, (2012)
- (6) Goodwin, R.D.: Toluene Thermophysical Properties from 178 to 800 K at Pressures to 1000Bar, Journal of Physical and Chemical Reference Data Vol.18, No.4 (1989), 1565-1636
- (7) 千田二郎, 山田耕司, 竹内貴一郎, 三木英雄: 高温壁面に衝突する液滴の変形及び分裂挙動, 日本機械学会論文集 (B 編) 52 巻 481 号, (1986), 3372 - 3379
- (8) Zama, Y., Odawara, Y., Furuhashi, T.: Experimental study on velocity distribution of post-impingement diesel spray on a wall, Part 2: Effect of ambient gas density and injection pressure on flow pattern, Atomization and Sprays, vol.24, no.8, (2014), 723 - 746