

# 特集 平板に衝突するガソリン燃料噴霧の液膜挙動解析\*

## Liquid Film Behavior of PFI Spray Impinging on a Flat Wall

佐藤孝明

Takaaki SATO

高橋幸宏

Yukihiro TAKAHASHI

中瀬善博

Yoshihiro NAKASE

久保田正人

Masato KUBOTA

In port fuel injection (PFI) and direct injection gasoline engines, fuel spray impinges, adheres and forms a fuel film on the wall of intake ports, valves and pistons. These films affect exhaust emissions and transient performance. Therefore it is important to understand the fundamental behavior of these films. It is also an effective way to improve the accuracy of CFD (Computational Fluid Dynamics) that is widely adopted to calculate the spray, film and mixture in engines.

In this paper, the behavior of the film on the wall was investigated by impinging PFI spray against a flat wall. Using a high-speed camera, the effects of the impinging angle, distance from the wall, and wall temperature were qualitatively clarified. Where the spray characteristics are the same, the spreading velocity of the film is proportional to the parallel component to the wall of the spray velocity. The surface undulation of the film grows as the wall temperature rises in the case of n-heptane. In the case of gasoline, the surface of the film is smoother than n-heptane. The behavior of the gasoline film can be accurately replicated using a three-component surrogate fuel which possesses a distillation rate similar to gasoline. This implies there is a potential to improve the accuracy of CFD without an extreme increase in the calculation load.

**Key words:** Fuel film, Wall impingement, Gasoline spray, Multi-component fuel, Surrogate fuel

### 1. 緒言

ガソリンエンジンにおいては、噴射された燃料が燃料液膜として吸気ポートやシリンダ壁面に付着し、HC エミッションやエンジン出力の過渡特性に影響を与える<sup>1)3)</sup> インジェクタ形状やエンジンへの搭載方法を決定するためには、この燃料液膜の基礎的な挙動を理解することが重要である。また、噴霧や液膜、エンジン筒内の混合気を計算するために用いられる数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics: 以下 CFD と略す) の計算精度を向上させるためにも、壁面に付着する燃料液膜の挙動を明らかにすることは重要である。

この研究は、ガソリン噴霧が平板に衝突したときに形成する燃料液膜の挙動に関する基礎的な研究に関するものである。本報告では、ガソリンエンジン用ポート噴射インジェクタを用い、壁面に対するインジェクタ角度や距離、壁温や燃料組成などの条件が壁面衝突後の液膜挙動に及ぼす影響を明らかにした。

### 2. 実験装置および実験方法

#### 2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。ガソリンエンジン用ポート噴射インジェクタから噴射された燃料は、平板に衝突し、燃料液膜を形成する。この液膜の挙動を高速

度 CCD カメラ (Phantom V7.0, 10,000 fps, 512 × 384 pixels) を用いて観察した。光源にはメタルハライドランプ (300 W × 2) を使用した。

燃料はポンプを用いて 300 kPa に加圧し、デリバリパイプに接続した 1 本のインジェクタから噴射した。デリバリパイプには脈動を吸収する圧力ダンパを取り付けた。吸気ポート内へのいろいろなインジェクタ搭載方法を模擬するため、壁面に対する噴霧の角度やインジェクタ先端から衝突点までの距離を変えられるようにした。

燃料噴霧を衝突させる平板には 10 mm 厚のアルミニウム板を使用した。平板の下側には面状ラバーヒータを取り付け、壁表面温度を変えられるようにした。

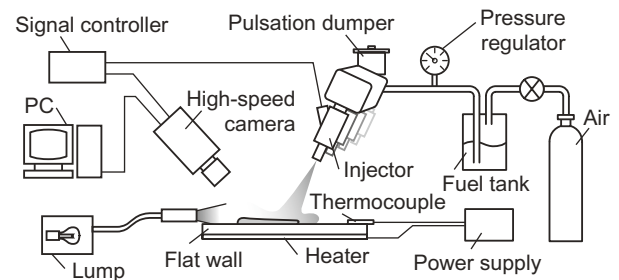


Fig. 1 Experimental apparatus

## 2.2 実験条件

壁面に対するインジェクタの角度： $\theta$ と衝突点までの距離： $L$ は、それぞれ30, 60, 90°および70, 90 mmとした。このときの壁面温度は30℃とした。インジェクタの角度： $\theta$ と距離： $L$ の定義をFig. 2に示す。

液膜挙動に対する壁面温度： $T_w$ の影響を調べるため、 $T_w$ を30℃から150℃まで変えた。この時の $\theta$ および $L$ はそれぞれ60°および80 mmとした。これらの試験では燃料としてn-ヘプタンを使用した。

また燃料性状が燃料液膜の蒸発に与える影響を調べるため、約250種類の成分からなるガソリン（ハイオクタン）燃料を使用し、 $T_w$ を30℃から150℃まで変えて試験を行なった。使用したガソリン燃料の主要成分をFig. 3に示す。

また、ガソリン燃料の蒸留特性を模擬した3成分からなる模擬（サロゲート）燃料<sup>4)</sup>を使用し、その液膜挙動を観察し、ガソリン液膜との比較を行なった。サロゲート燃料の成分をTable 1に示す。また使用したガソ

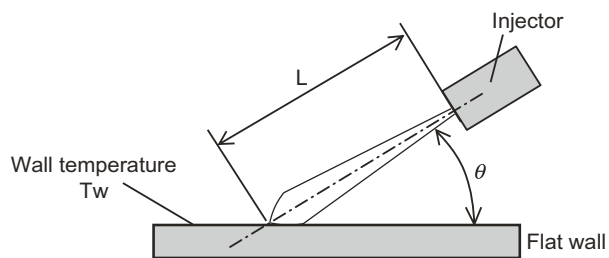


Fig. 2 Distance and angle against flat wall

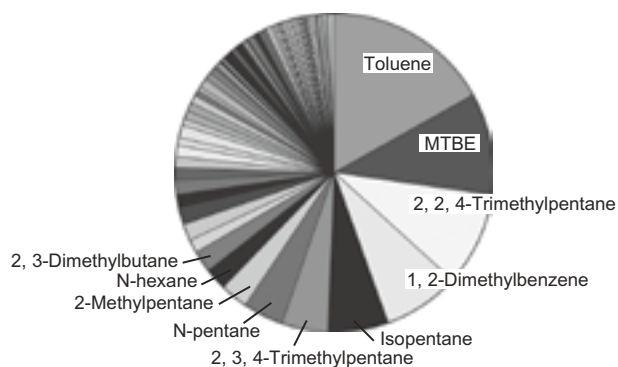


Fig. 3 Main components of gasoline

Table 1 Components of surrogate fuel

Component	Weight (%)
Toluene	45
N-pentane	35
1, 3, 5-Trimethylbenzene	20

リンとサロゲート燃料の蒸留特性をFig. 4に示す。

雰囲気温度、圧力は常温、常圧とした。実験条件をTable 2に示す。

## 3. 結果および考察

### 3.1 燃料液膜の形成過程

平板上におけるn-ヘプタンの液膜形成の様子をFig. 5に示す。インジェクタ角度： $\theta = 60^\circ$ 、距離： $L = 70$  mm、壁面温度： $T_w = 30^\circ\text{C}$ である。インジェクタから2本の噴霧が噴射され、噴霧は壁面に衝突後、壁面に沿って前方に成長していく。このとき壁面上に形成された液膜は噴霧の成長方向と同じ方向に成長していく。これは、液膜の運動量が衝突前の液滴の運動量を保持すること、また噴霧の成長に伴って形成される気流（随伴流）によって液膜が壁面上を吹き流されて移動することによると考えられる。本条件においては、噴射開始から35 msでは液膜は完全に静止している。

### 3.2 噴霧の角度および衝突点までの距離が液膜挙動に及ぼす影響

壁面に対するインジェクタ角度： $\theta$ と距離： $L$ を変

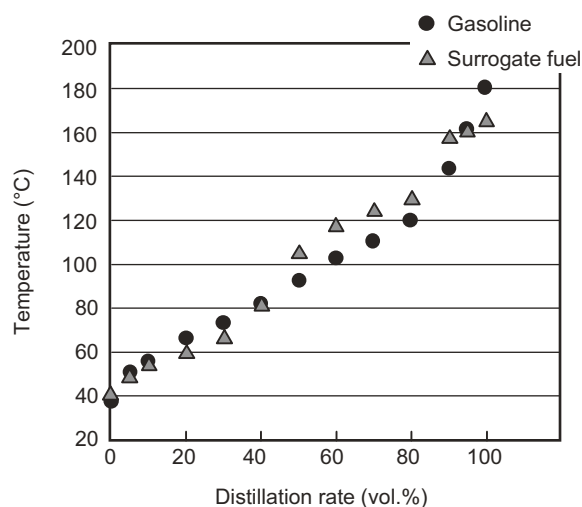


Fig. 4 Distillation rates of test fuel

Table 2 Experimental conditions

Distance against wall $L$ (mm)	70, 80, 90
Angle against wall $\theta$ (°)	30, 60, 90
Wall temperature $T_w$ (°C)	30, 60, 80, 100, 120, 150
Ambient temperature (°C)	25
Test fuel	n-heptane, gasoline, 3-component surrogate fuel
Fuel pressure (kPa.gauge)	300
Injection period (ms)	10

え、噴射開始から 35 ms における液膜形状を Fig. 6 に示す。燃料は n-ヘプタン、壁温は 30 °C である。図中の格子線は 5 mm 間隔で記してある。本研究で使用したインジェクタは 2 本の噴霧を噴射するが、インジェクタ中心軸に対し、噴霧の中心軸はわずかに外側へ傾いている。そのため、 $\theta = 90^\circ$  のケースでも、噴霧はわずかに外側へ成長していく。

Fig. 6 を見ると、 $\theta$  がいずれの場合でも、液膜は噴霧と同一の方向へ成長していくが、 $L = 70$  mm に比べ  $L = 90$  mm では、液膜の移動距離はやや短い。これは、壁面までの距離が長いと衝突時の液滴速度が空気抵抗により減少するため、液膜の移動速度・距離が減少すると考えられる。Fig. 6 の全条件において、高速度カメラ画像より算出した噴霧先端速度の壁面に対する水平方向

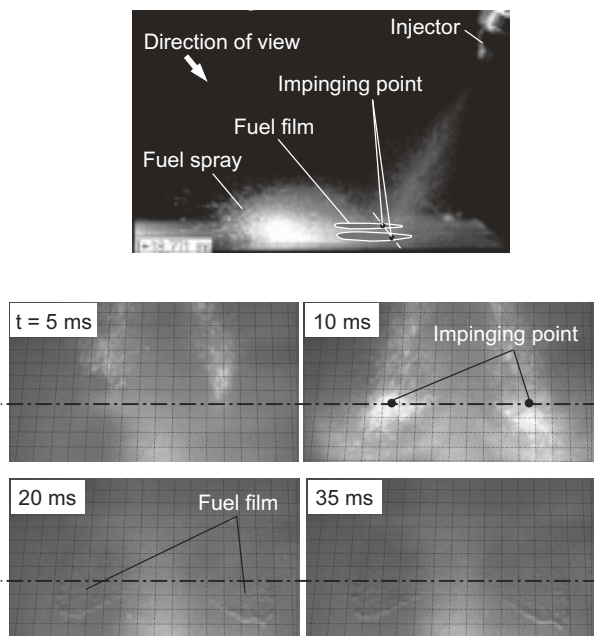


Fig. 5 Developing process of fuel film

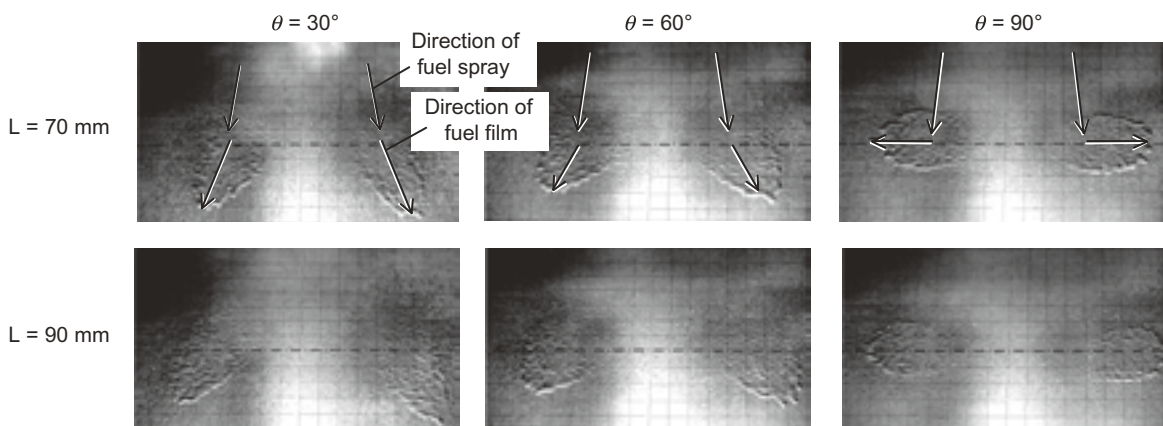


Fig. 6 Effects of angle and distance against the wall on fuel film behavior ( $T_w = 30$  °C, n-heptane)

成分と液膜先端速度の関係を Fig. 7 に示す。噴霧先端速度は壁面衝突の前後 0.5 ms における平均値であり、液膜先端速度は壁面衝突後 10 から 15 ms における平均値である。噴霧特性が同じ場合には、噴霧速度の水平方向成分と液膜の速度はほぼ比例するといえる。

### 3.3 壁温が液膜挙動に及ぼす影響

$L = 80$  mm,  $\theta = 60^\circ$  において、壁温:  $T_w$  を変えたときの噴射開始から 35 ms における液膜形状を Fig. 8 に示す。 $T_w = 30, 60, 80, 100$  °C は、壁温が n-ヘプタンの沸点と同等以下であり、液膜の沸騰が見られない非沸騰領域<sup>5)</sup> である。この領域では  $T_w$  が高くなるにつれて液膜表面の凹凸が大きくなる様子が分かる。これは、液膜の形成初期から厚さむらがあり、その薄い部分では壁面からの熱伝達によって温度が速やかに上昇し、蒸発が促進されるためと考えられる。

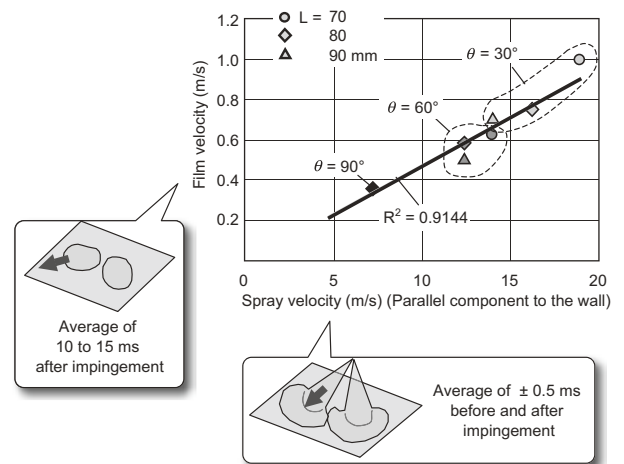


Fig. 7 Correlation between spray velocity and film velocity

n-ヘプタンの核沸騰領域<sup>5)</sup>となる  $T_w = 120\text{ }^\circ\text{C}$ においては、燃料は壁面にほとんど付着せずに丸い液塊状となり、その中で核沸騰が見られた。 $T_w = 150\text{ }^\circ\text{C}$ では、燃料は壁面に衝突後すぐに飛散し、壁面への液膜付着、残留は全く見られなかった。

### 3.4 燃料性状が液膜挙動に及ぼす影響

ガソリン燃料と、3成分サロゲート燃料を使用し、 $T_w$ を30から150 $^\circ\text{C}$ まで変えた時の噴射開始から35msにおける液膜形状をFig. 9に示す。その他の条件はFig. 6およびFig. 8と同一である。 $T_w = 80\text{ }^\circ\text{C}$ および100 $^\circ\text{C}$ において、ガソリン燃料の場合はn-ヘプタンに

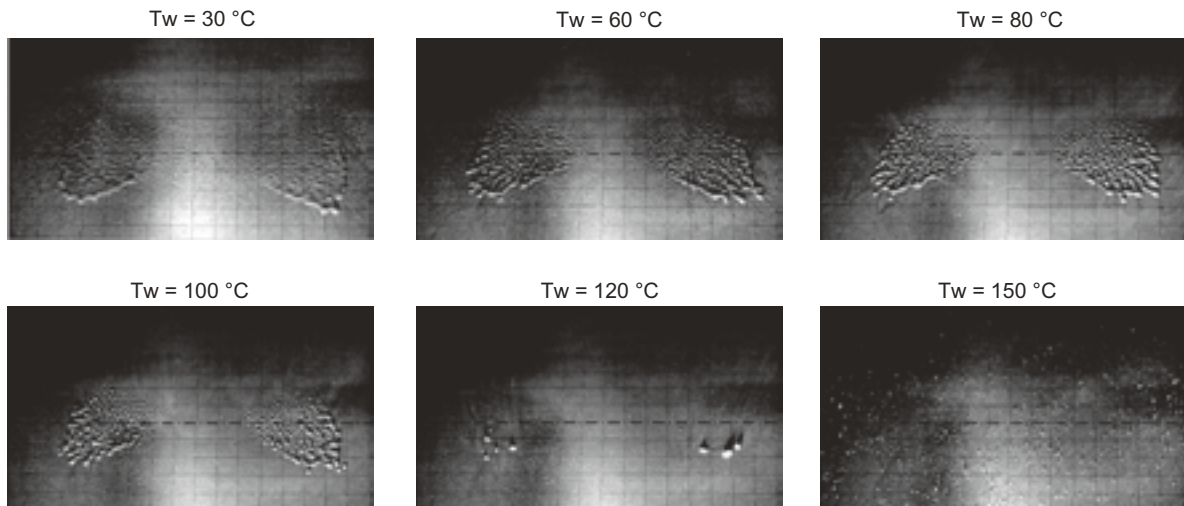


Fig. 8 Effects of wall temperature on fuel film behavior ( $L = 80\text{ mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ , n-heptane)

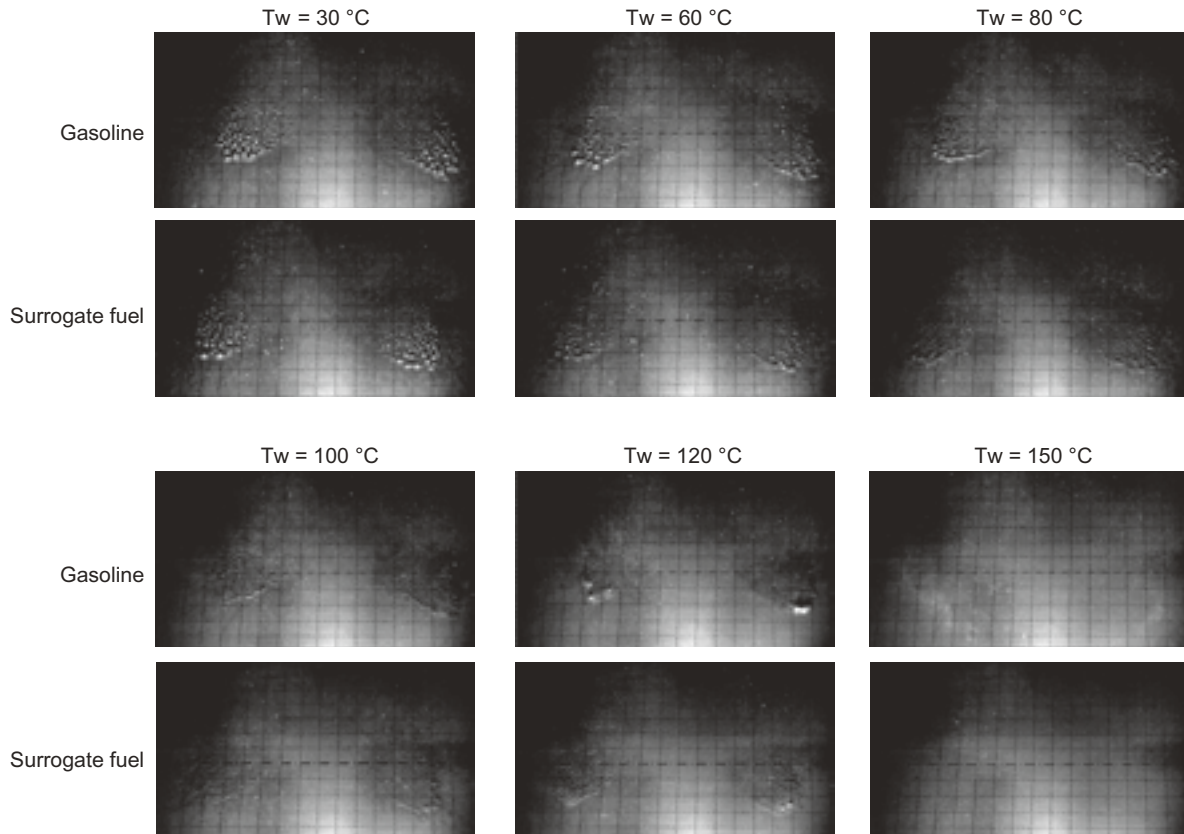


Fig. 9 Effects of fuel properties on fuel film behavior ( $L = 80\text{ mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ )



比べより薄く、均一な液膜が形成されている。また  $T_w = 120^\circ\text{C}$  では、非常に薄い液膜が残留し、液膜の前方端では核沸騰が見られる。 $T_w = 80^\circ\text{C}$  程度以上の壁面温度が高い場合において、多成分燃料であるガソリンと単成分燃料である n-ヘプタンでは液膜の挙動が全く異なることが分かる。CFD を用いて液膜挙動を解析する際にはこのことに充分留意する必要がある。

3成分サロゲート燃料は、壁温が高い場合においてもガソリンの液膜挙動をよく再現している。このことから、ガソリンのような多成分燃料の液膜挙動は、数種類の成分を混合し蒸留特性を近づけることで、高温壁面上の液膜挙動を再現できることが分かった。また CFD においては数種類の混合燃料を計算することで、計算負荷を大幅に増大することなく液膜挙動の計算精度を向上できる可能性がある。

#### 4. 結言

ガソリンエンジン用ポート噴射インジェクタを用い、噴霧が平板に衝突した後の液膜挙動を観察した結果、次のことが分かった。

- (1) 噴霧は壁面に衝突後、壁面に沿って前方に成長していく。このとき壁面上に形成された液膜は噴霧の成長方向と同じ方向に成長していく。噴霧特性が同一の場合には、この液膜速度は壁面衝突時における噴霧先端速度の壁面に対する水平方向成分とほぼ比例する。
- (2) n-ヘプタンの液膜は、壁温の上昇とともに液膜表面の凹凸が顕著になる。壁温が n-ヘプタンの沸点を超えて  $120^\circ\text{C}$  になると、液膜はほとんど見られず液塊として残留し、その内部では核沸騰が見られる。壁温が  $150^\circ\text{C}$  では噴霧衝突後、燃料は壁面に衝突後すぐに飛散し、燃料の付着・残留は見られない。
- (3) ガソリンの液膜は、壁温が高くなるとともに n-ヘプタンの液膜に比べ薄く均一となる。ガソリンのような多成分燃料と n-ヘプタンのような単成分燃料では全く異なる液膜挙動を示すため、CFD を用いて燃料液膜の挙動を解析する際には充分留意する必要がある。
- (4) 3成分サロゲート燃料は、壁温が高い場合においてもガソリンの液膜挙動をよく再現できた。ガソリンのような多成分燃料の液膜挙動は、数種類の成分を混合し蒸留特性を近づけることで、高温壁面上の液膜挙動を再現できる。また CFD においては数種類の混合燃料を計算することで、計算負荷を大幅に増大することなく液膜挙動の計算精度を向上できる可能性がある。

#### <参考文献>

- 1) G. Almkvist, I. Denbratt, G. Josefsson, I. Magnusson: "Measurement of Fuel Film Thickness in the Inlet Port of an S.I. Engine by Laser Induced Fluorescence", SAE952483 (1995).
- 2) W. Hentschel, A. Grote, O. Langer: "Measurement of Wall Film Thickness in the Intake Manifold of a Standard Production SI Engine by a Spectroscopic Technique", SAE972832 (1997).
- 3) K. R. Koederitz, M. R. Evers, G. B. Wilkinson, J. A. Drallmeier: "Break-up of liquid fuel films from the surfaces of the intake port and valve in port-fuel-injected engines," Int. J. Engine Research, Vol. 3, No. 1, p. 37.
- 4) H. Miyagawa, M. Nagaoka, K. Ohsawa, T. Yamada: "Spray vaporization model for multi-component gasoline", JSAE Review 19 (1998), pp. 299-304.
- 5) J. Senda, T. Takahashi, H. Fujimoto: "Spray-Wall Interaction Model Considering Superheating Degree of the Wall Surface", JSME International Journal Ser. B, Vol. 66, No. 642 (2000).



<著 者>



佐藤 孝明  
(さとう たかあき)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
ガソリン・ディーゼルエンジンの  
噴射ノズル開発に従事



高橋 幸宏  
(たかはし ゆきひろ)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
ガソリンエンジンのエミッション  
低減技術開発に従事



中瀬 善博  
(なかせ よしひろ)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
ガソリンエンジンの研究開発に従事



久保田 正人  
(くぼた まさと)  
トヨタ自動車(株)  
FP部  
エンジン筒内関係のCFD開発  
業務に従事