

# 特集 ポート噴射エンジンにおける付着燃料の液膜厚さ解析\*

## Analysis of the Fuel Liquid Thickness on the Intake Port and Combustion Chamber of a Port Fuel Injection Engine

高橋 幸宏

Yukihiro TAKAHASHI

中瀬 善博

Yoshihiro NAKASE

加藤 雄一

Yuuichi KATOU

In this paper, the authors have developed a new measuring method of the liquid fuel film thickness on walls, such as intake ports and the combustion chamber of a Port Fuel Injection engine. Using this method, we analyzed the formation process of the fuel film thickness on the walls of a PFI engine during cold starting (coolant temperature of 25 °C), and clarified the influence of intake cam configurations at cold start on the liquid fuel behavior using two different intake cams.

**Key words:** Gasoline engine, Fuel injection, Experiment/Laser induced fluorescence, Film thickness, Cold starting, Hydrocarbon

### 1. はじめに

近年、地球環境保護への関心が高まり、自動車用エンジンに対して徹底したクリーンな排気が求められている。また、米国カリフォルニア州の排出ガス規制に代表されるように厳しい排出ガス規制が設けられている。これらの規制に対応するためには、冷始動時の未燃 HC の低減が重要である。ポート噴射ガソリンエンジンから排出される未燃 HC は、エンジン内の燃料挙動、すなわち吸気ポート壁やシリンダ壁に付着した燃料液膜と関係が深い。特に始動時においては、機関温度が低い状態で、多量の燃料を噴射するため、吸気ポート壁やシリンダ壁に付着する燃料が多い。シリンダ壁に付着した燃料は、排気行程のピストン上昇時に、未燃層かき上げにより排出される。また、エンジン始動時に吸気ポート壁に付着した燃料は、発進時の加速によりシリンダに流れ込み、未燃 HC の要因となると考えられる。これら壁面に付着する燃料液膜の挙動を解明することは、エンジン始動時の未燃 HC 低減技術の開発において、非常に重要である。

我々は、エンジン実働時において、吸気ポートや筒内の壁面に付着した燃料の液膜厚さを計測する技術として、レーザー誘起蛍光法 (LIF 法) と光ファイバを組み合わせたファイバ LIF 法を開発した。本報告では、開発した計測技術と、これを用いて、吸気カム諸元をパラメータに冷始動時の液膜厚さを解析した結果を紹介する。

### 2. 計測技術の開発

LIF 法は、レーザー光を照射させて蛍光物質を励起し、蛍光した光の強度から対象となる物理量 (濃度、温度

etc.) を計測する手法である。この蛍光強度  $L_f$  は次式より与えられる。

$$L_f = Q(T, \lambda) \times I_0(\lambda) \times \alpha(T, \lambda) \times c \times d^{1)}$$

ここで  $Q$  は量子効率、 $I_0$  は励起強度、 $\alpha$  はモル吸光係数、 $c$  は蛍光剤の濃度、 $d$  は液膜の厚さである。ファイバ LIF 法を用いて、液膜厚さを高精度で計測するには、効率的な励起と蛍光の受光が重要と考え、我々は以下の検討を行い、従来手法に改良を加えることで、高精度なファイバ LIF 法を開発した。

#### 2.1 励起用レーザーの選定

使用した燃料は、レギュラー燃料 (多成分燃料: 50% 蒸発点 93 °C) に、蛍光剤 2, 3 ブタンジオン (別名: ジアセチル 沸点: 88 °C) を 4 vol% 混入したものとした。文献 1) ~ 4) でも使用されているこの蛍光物質は、常温で液体であり沸点がガソリンの 50% 蒸留点に近いので液膜厚さの計測には適している。この蛍光燃料で各波長に対する蛍光強度比を調査した結果を Fig. 1 に示す。調査した 5 種類のレーザーの波長 (405 nm, 442 nm, 458 nm, 488 nm, 515 nm) において、波長 442 nm の蛍光強度比が最大となることが分かった。文献 1) では 458 nm のレーザーを使用しているが、波長 442 nm のレーザーを使用すると、蛍光強度比が約 35% 向上できることが分かった。

\* (社)自動車技術会の了解を得て, "Proceedings of FISITA 2006 World Automotive Congress Yokohama, F2006 P106" より, 和訳して転載

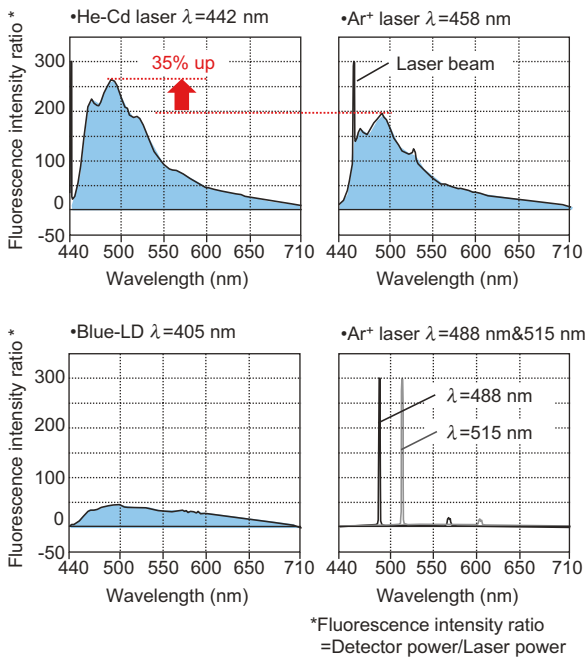


Fig. 1 Fluorescence intensity ratio

### 2.2 光ファイバの選定

光ファイバは、燃料の付着面へのレーザ光の照射と、蛍光の受光の光路として使用するため、双方向の光路が必要となる。これまでに紹介されている手法では、レーザ光の照射用ファイバと、蛍光の受光用ファイバをバンドルした複数本のファイバを使用していた<sup>1)2)</sup>このバンドルファイバを用いた方法では、Fig. 2 に示すように、蛍光領域と、受光ファイバ端面の位置に軸ズレが生じるため受光効率が低下していた。そこで、レーザ光の照射と蛍光の受光に、単芯の光ファイバ1本を用いることで、蛍光領域と受光位置を同一直線上にして受光効率の向上を図った。

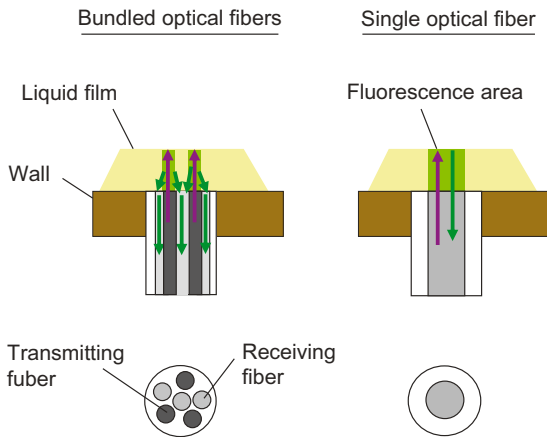


Fig. 2 Deference between bundle optical and single optical fiber

### 2.3 光学系の設計

Fig. 3 に計測装置の光学系全体図を示す。光ファイバ内はレーザ光と蛍光の光路が同一となっており、それ以外については、ハーフミラーを用いた光学系で分離している。蛍光の光路には、レーザ波長の除去にラマンノッチフィルタ、更に、バックグラウンドノイズの除去にバンドパスフィルタ（490 ± 10 nm の波長のみを通過）を設置した。これらのフィルタで取り出した光を、光電子倍增管（Photomultiplier 浜松フォトニクス製：R1924A 応答性：1.5 ns）で受光して蛍光強度を電圧値に変換する構成とした。

### 2.4 液膜厚さへの換算

計測した蛍光強度を液膜厚さに換算する際には、あらかじめ計測した検定曲線を用いた。検定曲線は、Fig. 4 に示す装置を用いて、規定の液膜厚さにおける蛍光強度を計測し、検定曲線を作成した。蛍光強度の温度依存性は、温度 20 ~ 40 °C までは、温度の蛍光強度への影響は小さい。そのため、冷始動時では、温度の影響は無視できるレベルであると考ええる。また、本計測手法の繰り返し精度は、± 5 % 以内であることを確認した。

## 3. エンジンでの付着燃料の液膜厚さの計測

### 3.1 計測条件と計測位置

Table 1 の直列 4 気筒ポート噴射エンジンにデンソー製 12 噴孔デュアルスプレのインジェクタを用いて液膜厚さの計測を行った。評価した吸気カムは、開弁：吸気 TDC 前 3° CA, 閉弁：BDC 後 40° CA, リフト量：9.4 mm のカム（以下、標準カムと呼称）と、開弁：吸気 TDC 後 40° CA, 閉弁：BDC 前 16° CA, リフト量：1.4 mm のカム（以下、小カムと呼称）の 2 水準とした。

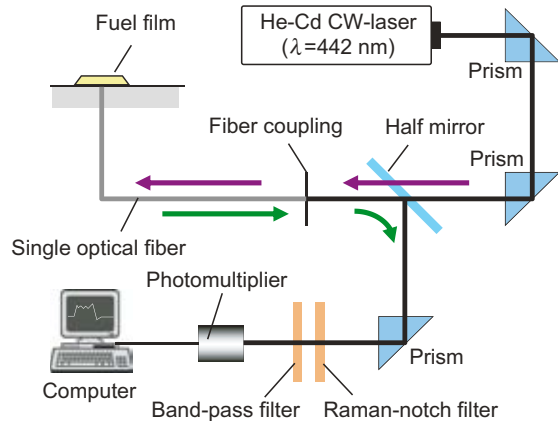


Fig. 3 Set-up of the optical arrangement with single optical fiber

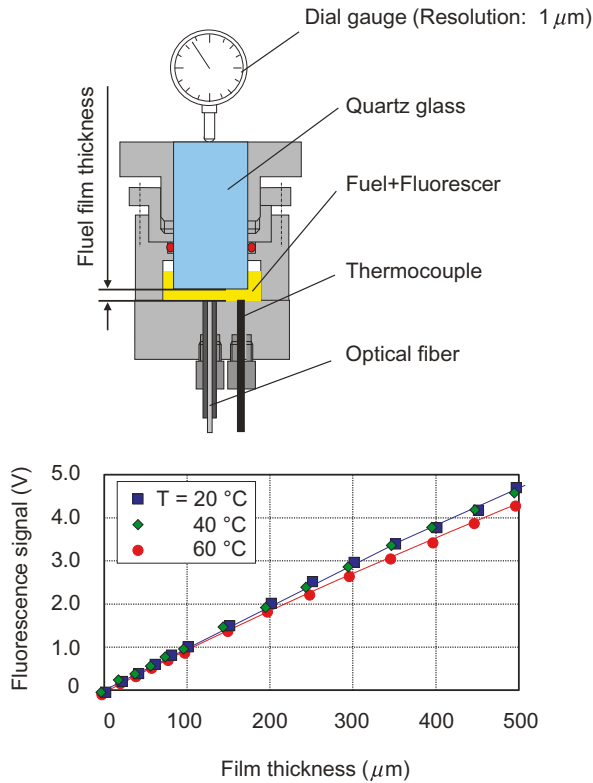


Fig. 4 Calibrating rig and fluorescence signal vs. film thickness

これらの吸気カム諸元は、一般的な可変動弁機構における相対的な諸元として選定した。また、排気カムは同じものを使用した (Table 2)。冷始動時のエンジン条件を Table 3 に示す。初期クランク位置は、#1 気筒の圧縮 TDC とし、クランキング回転数 200 r/min にてエンジンを始動させ、燃焼は #1 → #3 → #4 → #2 の順番に行った。噴射タイミングは、1 サイクル目が噴射開始 150° CA BTDC、2 サイクル目以降は噴射終了 60° CA ATDC としている (吸気 TDC 基準)。Fig. 5 に液膜厚さの計測位置を示す。計測位置は、#4 気筒の吸気ポート 4 箇所 (①ポート下側 15 mm, ②ポート下側 10 mm, ③ポート上側 15 mm, ④ポート上側 10 mm)、筒内燃焼室 2 箇所 (⑤ペントルーフ頂上, ⑥排気スキッシュ)、シリンダ壁 2 箇所 (⑦吸気側 15 mm, ⑧排気側 15 mm) の計 8 箇所を設置した。

### 3.2 標準カムの液膜挙動

標準カムの計測結果を Fig. 6 に示す。筒内計測位置⑤～⑧において、圧縮 TDC 付近にある出力ピークは、燃焼光を受光したものであり、蛍光燃料による出力増加ではない。吸気ポート下側①②では、始動 1 サイクル目

Table 1 Engine specifications

Type	Four-cylinder, in-line
Cylinder head	DOHC 4valves
Displacement	2.4 L
Bore × Stroke	88.5 mm × 96.0 mm
Comb. chamber	Pent roof type
Compression ratio	9.6
Fuel injector	12 hole type, SMD: 80 μm

Table 2 Intake and exhaust valve timing

Intake valve timing		*Intake valve opening **Intake valve closing		
	IVO*	IVC**	Lift	Opening time
High lift cam	3 BTDC	60 ABDC	9.4 mm	243° CA
Small lift cam	40 ATDC	16 BBDC	1.4 mm	124° CA

Exhaust valve timing (Common use)		***Exhaust valve opening ****Exhaust valve closing		
	EVO***	EVC****	Lift	Opening time
Conventional cam	45 BTDC	3 ABDC	8.7 mm	228° CA

Table 3 Running conditions at cold starting

Coolant temp.	25 °C
Oil temperature	25 °C
Cranking speed	200 r/min
Starting position	#1 Cylinder compression TDC
Injection timing (Intake TDC origin)	1 cycle : Start 150 BTDC
	2 to 6 cycle : End 60 ATDC

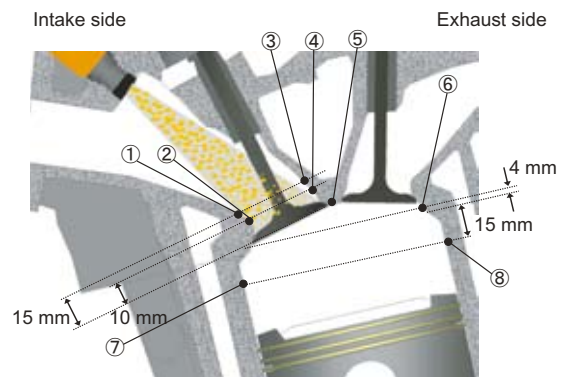


Fig. 5 Location of the optical fibers

から階段状に液膜が厚くなり、6 サイクル後、ポート下側の計測位置① 15 mm の位置で約 140 μm、② 10 mm の位置で 80 μm の液膜が形成していた。吸気ポート上側③④では、1 サイクル目では液膜が付着せず、2 サイ

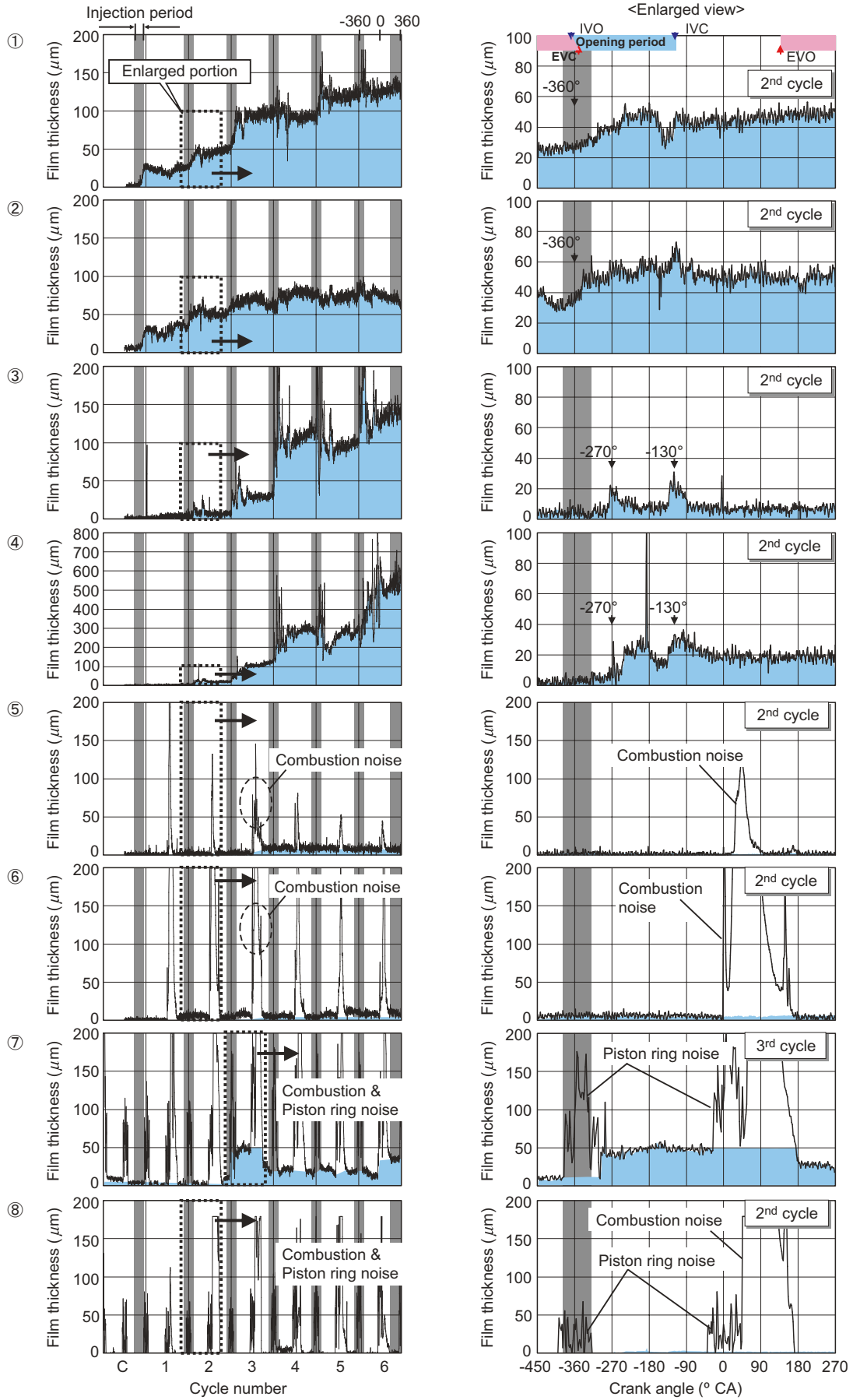


Fig. 6 High lift cam liquid film behaviors at cold starting (Cranking to 6cycle)

クル目以降から液膜が形成され、6 サイクル後、③ 15 mm の位置で約 150  $\mu\text{m}$ 、④ 10 mm の位置で約 550  $\mu\text{m}$  の液膜が形成される。筒内では、ペントルーフ頂上、排気スキップ、排気側シリンダ壁面における液膜形成は少ないが、吸気側シリンダ壁面には、始動3 サイクル目の吸気行程から液膜が厚くなる様子が計測された。これは、吸気ポートに付着した多量の液体燃料が、壁面流れとなって筒内の吸気側シリンダ壁に流入した現象を捉えたものと推測する。

さらに、詳細な燃料挙動を把握するため、始動2 サイクル目に着目し、クランク角度に対する燃料液膜の厚さ変化を調査すると以下のことが分かった。ポート部下側①②で液膜が厚くなるタイミングはクランク角度 $-360^\circ$  CAあたりで、これはインジェクタの噴霧が壁面に衝突するタイミングにあたる。ポート上側③④で液膜が厚くなるタイミングは、ピストン速度が最も速くなるタイミング( $-270^\circ$  CA)と吸気弁の着座タイミング( $-130^\circ$  CA)にあたる(図中拡大部)。

このことから、吸気ポート壁面の上側と下側では付着燃料の形成過程が異なり、ポート下側の燃料液膜は、インジェクタ噴霧が直接衝突して形成したものであり、ポート上側の燃料液膜は、吸気バルブ等に付着した燃料が、バルブ着座の衝撃や筒内からの吹き返し等で、はく離し再度付着したものと推測できる。

### 3.3 小カムの液膜挙動

小カムの計測結果を Fig. 7 に示す。吸気ポート下側①②では、標準カムよりも液膜厚さは薄いですが、始動1 サイクル目から階段状に液膜が厚くなり、6 サイクル後、ポート下側の計測位置① 15 mm の位置で約 50  $\mu\text{m}$ 、② 10 mm の位置で25  $\mu\text{m}$  の液膜が形成していた。吸気ポート上側③④では、始動6 サイクル間に渡り全く液膜は形成されなかった。これとは対照的に、筒内では厚い液膜が計測された。ペントルーフ頂上⑤では、始動2~6 サイクルの吸気行程において200  $\mu\text{m}$  を超える厚い液膜が計測され、排気スキップ⑥では、1 サイクル目の排気行程の初期に約 100  $\mu\text{m}$  の液膜が一気に形成し、吸気バルブ開弁直後に薄くなっていた。また、排気側シリンダライナ⑧では、最大 90  $\mu\text{m}$  の液膜が形成している。

この結果から、小カムでは始動1 サイクル目の吸気行程から、多量の液体燃料が筒内に流入していると考えられる。燃焼室では、吸気行程中に燃焼室壁面を伝わって液膜が流動し、排気側の壁面では、吸気行程に一気に付着燃料が形成し、排気バルブ開弁直後のブロー

ダウンによって、排気バルブ方向に液膜が流動したと推測する。ただ、吸気側シリンダライナ⑦においては、5 サイクル目から液膜が形成しており、標準カムよりも付着するタイミングが遅い。このことから、吸気側シリンダライナの液膜は、ポート付着燃料が筒内に壁面流れで流入して形成したものと推測する。

## 4. 考察

以上の結果から、付着燃料の挙動と空気流動には大きな関係があると考えられる。そこで、1次元シミュレーションのGT-POWERを用いて、吸気バルブ開弁期間中の空気流動の解析を行った(Fig. 8)。シミュレーションは、液膜厚さ計測時の始動1 サイクル目に相当する条件(エンジン回転数 200 r/min, 吸気管圧力 101.3 kPa, 水温 25  $^\circ\text{C}$ )で行った。標準カムでは、吸気バルブ開閉時に高速な逆流(筒内から吸気ポート方向への流れ)が生じている(IVO時:約 80 m/s, IVC時:約 200 m/s)。小カムでは、吸気バルブ開弁時に筒内方向の高流速(280 m/s)・大流量(約 13.5 g/s)の流れが生じ、吸気バルブ閉弁時も筒内方向の高流速(約 50 m/s)が生じている。標準カムにおける逆流は、ピストン上昇期間中のバルブ開閉に伴うものであり、この逆流によって、吸気バルブ等に付着していた液体燃料が剥離・飛散し、吸気ポート全体に付着燃料が拡散したと推測する。逆に小カムでは、逆流が全く発生しない。そのため、標準カムよりも液膜が薄く、さらに噴霧が直接衝突しないポート上側壁面には液膜が形成しなかったと考える。

以上のことから、吸気バルブ開閉時の逆流がポート付着燃料挙動に大きく影響すると考える。次に、小カムにおける筒内方向の流れは、ピストン下降期間中のバルブ開閉に伴うものである。特に開弁直前は筒内圧力が 60 kPa abs. まで減圧し、吸気管圧力との圧力差によって筒内方向に音速に近い気流が生じている。これらの筒内方向の気流によって、吸気バルブ等の付着燃料が開弁直後に一気に筒内に流入し、それが燃焼室や排気側にまで飛散したと推測する。逆に筒内方向に高速な気流が発生しない標準カムでは、ほとんど筒内に付着燃料が形成しない。以上のことから、吸気バルブ開弁時の高速な筒内方向の気流が筒内の付着燃料挙動、特に排気側への付着燃料形成に大きく影響すると考える。

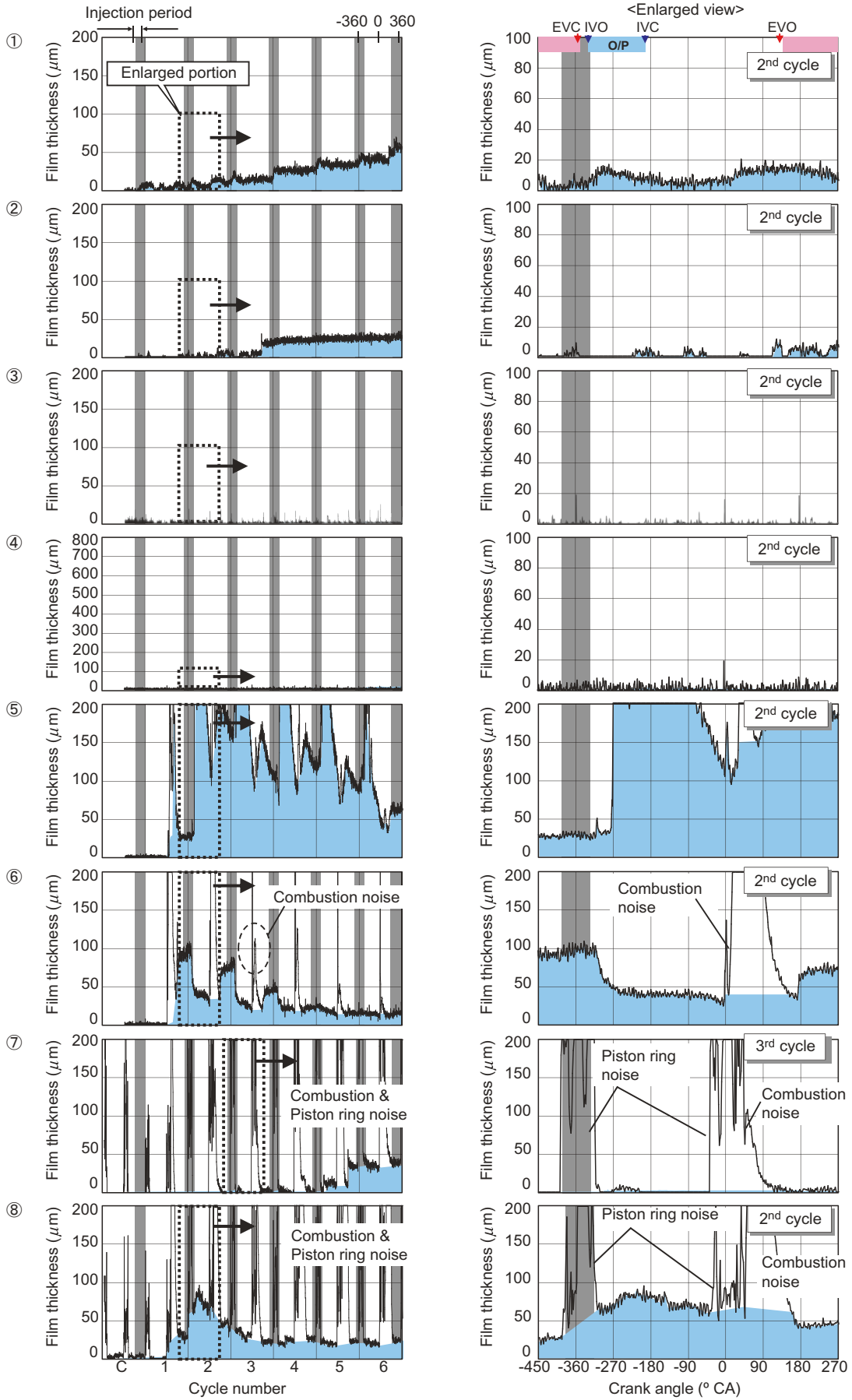


Fig. 7 Small lift cam liquid film behaviors at cold starting (Cranking to 6cycle)

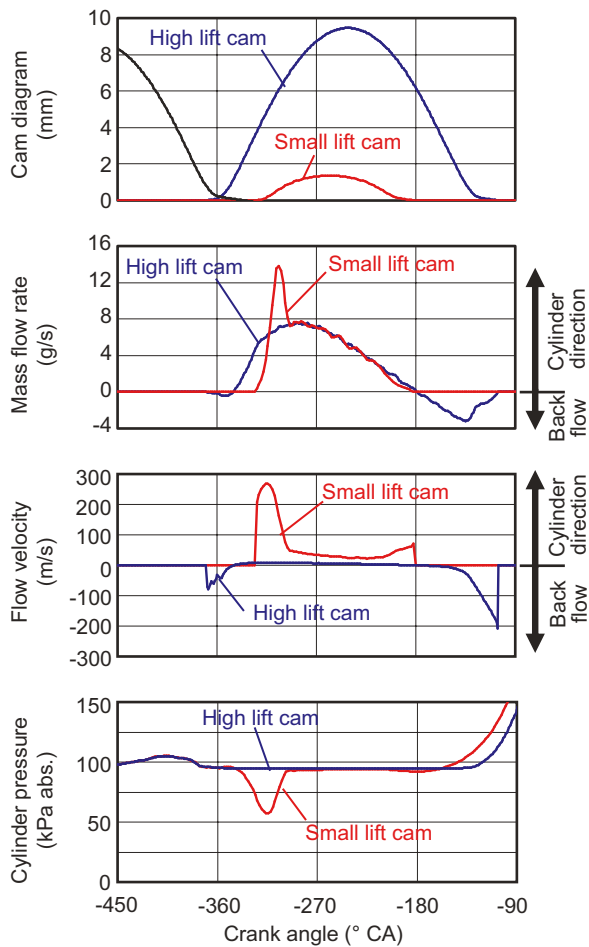


Fig. 8 Gas flow difference at intake valve seat between high lift cam and small cam

## 5. 結論

以上の計測結果より、下記の知見を得た。

- (1) 液膜厚さを±5%で計測できるファイバLIF法を開発した。この手法の特徴は、励起用レーザに連続光442 nm-He-Cdレーザを用い蛍光強度比を向上したこと、1本の光ファイバでレーザ光転送と蛍光の受光を行い、受光効率を向上させたこと、さらに光学フィルタで蛍光波長域だけを計測するようにしたことである。
- (2) 吸気ポートの付着燃料は、始動6サイクル間は増加傾向にある。また、吸気バルブ開閉時の吹き返しや吹き戻しの空気流動により、吸気バルブ等の付着燃料が飛散し、噴霧が衝突しないポート上側壁面にも厚い液膜が形成される。
- (3) 筒内の吸気側壁面では、ポート付着燃料の壁面流れによって付着燃料が形成し、燃焼室および排気側壁面では小カム等による筒内方向の高速な気流によって吸気ポート付着燃料が一気に筒内に流入した場合に形成する。

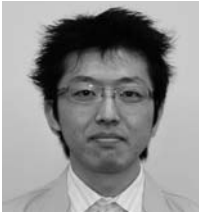
- (4) 始動時の排出HC低減のためには、吸気バルブ開閉時に筒内方向の高速流れが発生しないカム諸元にすることが重要である。

## <参考文献>

- 1) Werner Hentschel, Andreas Grote and Olaf Langer, "Measurement of Wall Film Thickness in the Intake Manifold of a Standard Production SI Engine by a Spectroscopic Technique/SAE Technical Paper", SAE, 972832 (1997).
- 2) T. Johnen and M. Haug, "Spray Formation Observation and Fuel Film Development Measurements in the intake of a Spark Ignition Engine/SAE Technical Paper", SAE, 950511 (1995).
- 3) Goran Josefsson and Ingemar Magnusson, "Measurements of Fuel Film Thickness in the Inlet Port of an S. I. Engine by Laser Induced Fluorescence /SAE Technical Paper", SAE, 952483 (1995).
- 4) S. Park and J. B. Ghandhi, "Fuel Film Temperature and Thickness Measurements on the Piston Crown of a Direct-Injection Spark-Ignition Engine/SAE Technical Paper", SAE, 2005-01-0649 (2005).



<著 者>



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  
パワートレイン分野の研究開発に  
従事



加藤 雄一  
(かとう ゆういち)  
トヨタ自動車(株)  
パワートレイン制御開発部  
ガソリンエンジンのエミッション  
低減技術開発に従事