

# 特集 直噴ガソリンエンジンにおける成層燃焼解析\*

## A Study of Stratified Charge Combustion Characteristics in Direct Injection SI Gasoline Engine

中島 樹志

Tatsushi NAKASHIMA

馬崎 政俊

Masatoshi BASAKI

斎藤 公孝

Kimitaka SAITO

古野 志健男

Shigeo FURUNO

A stratified charge system, which employs a thin fan-shaped fuel spray and a shell-shaped piston cavity, has been developed for direct injection gasoline engines. To clarify the characteristics of stratified mixture formation and combustion, spray motion visualization, measurement of local fuel concentration in piston cavity, and flame behavior observation were performed. The newly developed system achieves stable stratified combustion in the high-speed region due to optimization of the piston cavity shape and fuel spray characteristics, especially a suitable spray penetration with high injection pressure which ensures that the mixture formation is “robust” against air flow and facilitates the acceleration of mixture diffusion in the cavity.

**Key words :** Direct injection, Stratified charge combustion, Mixture formation, Fan-shaped fuel spray

### 1. はじめに

近年、ガソリン機関の出力、燃費と排気性能の一層の改善を目指して、筒内噴射システムの研究が進められている。

直噴ガソリンエンジンは、極めて希薄な条件で成層燃焼を実現し、高効率化を達成することができる。成層化を実現するために、様々な混合気形成のコンセプトが提案されてきたが、その大半は、空気流動を積極的に利用して混合気を点火プラグ周辺へ導く方法であり、インジェクタと点火プラグを離して配置し、広い空間を利用して適度な混合気の進行を実現するコンセプトである。しかし、出力向上を考えた場合、成層化手段である空気流動生成のための吸気ポート形状採用は体積効率の低減を招き、大きな課題となる。

この解決に向け、特別な気流生成機構を要せず、噴霧とピストンだけの構成で、広範囲の運転条件で成層燃焼を可能とするコンセプトが提案<sup>1)</sup>され、トヨタ自動車より日本国内にて量産化<sup>2)</sup>が果たされている。Fig. 1に本燃焼法の構成を示し、Table 1に量産化エンジンの主要諸元を示す。燃焼室構成は、下記二つからなる。

- (1) シェル型のキャビティを持つピストン
- (2) 高分散で適度な貫徹力を持つファンスプレー式高圧噴射弁<sup>3)</sup>

吸気系は従来エンジンのストレートポートを用いている。成層燃焼時は圧縮行程でピストンキャビティに向けて燃料噴射し、広角で微粒化レベルの高い噴霧がキャビティ底面に衝突後、底面及び対向壁面に沿って

点火プラグ側に移動し、点火プラグ周りに成層化した混合気を形成する。均質燃焼時は吸気行程にて燃料を噴射し、その噴霧特性を生かし燃焼室内に均質な混合気を形成する。

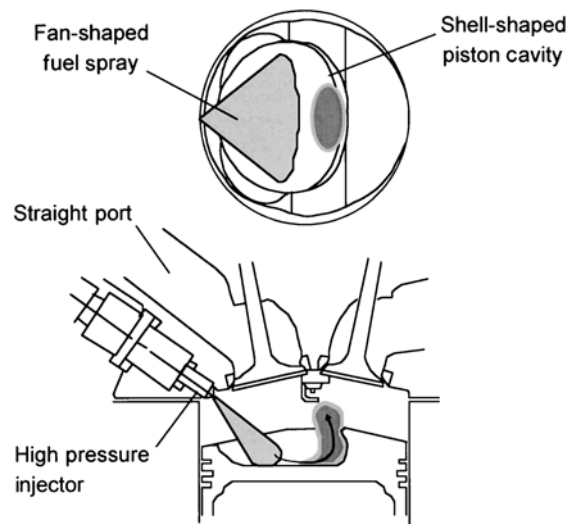


Fig. 1 Engine configuration around the combustion chamber

本研究では、このコンセプトに基づく混合気形成と燃焼の特性を明らかにするために、噴霧挙動の観察、局所混合気濃度の計測、火炎挙動の観察、筒内ガス流動の解析を行い、本コンセプト成立の機構、成層燃焼の形態を明らかにすることを試みた。

\* (社)自動車技術会の了解を得て、JSAE Review 24 (2003) 17-23を和訳、一部加筆して転載

Table 1 Engine specification

Displacement	2,997cm <sup>3</sup>
Bore,Stroke	86mm,86mm
Number of cylinders	L-6
Number of valves	Intake:2,Exhaust:2
Compression ratio	11.3
Combustion chamber	Pentroof with piston cavity
Air intake port	Straight port
Injector	Slit nozzle
Fuel pressure	~13MPa
Fuel	Premium(100RON)

## 2. 成層燃焼から要求される混合気形成要件

成層燃焼実現のためには、筒内混合気形成の時間的、空間的制御が不可欠である。ガソリンと空気の適度な混合気を点火という極めて限られた時間に、点火プラグ周辺に配置することで、燃焼の開始ともいえる着火が可能となる。

また、その後の燃焼を効率よく成し得るためには混合気の空間的濃度分布の制御が重要となる。つまり、過濃域が存在すると煤を含む不完全燃焼分を多く含むので、燃焼上は好ましくないが、成層燃焼の初期においては、ある程度の過濃混合気の燃焼は避けられない。過濃域で生成された煤の多くは膨張行程において周辺空気と混合、酸化するのでそのまま排気されることは少ないが、TDC近傍での燃焼効率が小さくなり、発熱量を減じてしまう問題がある。更に、混合気周辺の過薄な混合気か、それが原因となって主混合気から剥離した混合気が形成された場合には、火炎伝播が行き届かず、未燃HCとして排出されることとなる。つまり、成層度が強すぎても分散傾向にあっても燃焼効率の低下を招く。

以上のことから、成層燃焼から要求される混合気形成の要件は、

- (1) 点火プラグ周り混合気の時間的、空間的安定性
  - (2) 適度な成層度と拡散の両立
- に代表される。

## 3. 燃焼特性、混合気形成解析手段

成層燃焼は、点火による初期火炎の形成後、中心に過濃域の存在する濃度勾配のある混合気を火炎が伝播して燃焼が進む。この時、火炎伝播と混合気拡散の同期進行が必要である。すなわち、火炎伝播は混合気拡散に先行できないこと、及び拡散によって火炎伝播不能な希薄濃度になる前に火炎が伝播しなければなら

いという火炎伝播と混合気拡散の極めて微妙な進行バランスによって成層燃焼が支えられている。そのため、成層燃焼を理解するには燃焼プロセス解析、及び燃焼と共に時々刻々変化する混合気形成プロセスの把握が重要となる。更にエンジン筒内には、吸気流、ピストンモーション等によりガス流動が生成し回転数に依存して変化するため、噴霧挙動を変化させ、ひいては混合気形成に影響を与えることとなる。このことから筒内現象を把握するため、下記の解析手法を準備した。

### 3.1 燃焼特性解析

燃焼特性の解析には、火炎挙動の観察を実施した。本供試エンジンの成層燃焼制御領域全域を筒内観察し得るよう、量産実機エンジンベースの可視化エンジンを準備した。今回準備した可視化エンジンの構成をFig. 2に示す。ライナ、及びヘッド側に小面積の円形可視化窓を設け、リレーレンズからなる内視鏡を介して燃焼室内を観察した。駆動系の変更が無いため、従来の石英製ガラスシリンダ、ピストン等を用いた単気筒typeの可視化エンジンでは不可能であった高速域の観察を可能とした。

撮影に供試した高速度カメラをFig. 3に示す。MCP型イメージンテンシファイア(感光帯域200~850nm)を内蔵する3板式高速度ビデオカメラ((株)フォトン製、256×256画素、最高撮影速度40500fps)であり、分光ミラーを介して、各撮影素子に特定の波長領域の映像を分配(200~450, 450~530, 530~850nm)する構成としている。各撮影素子の前面に光学フィルタを装着し、火炎を分光撮影することで、3種の化学種を同時に撮影することが可能である。

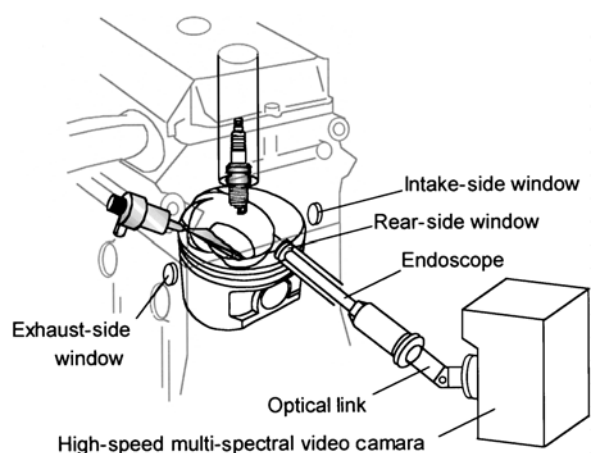


Fig. 2 Photographic system to observe flame behavior

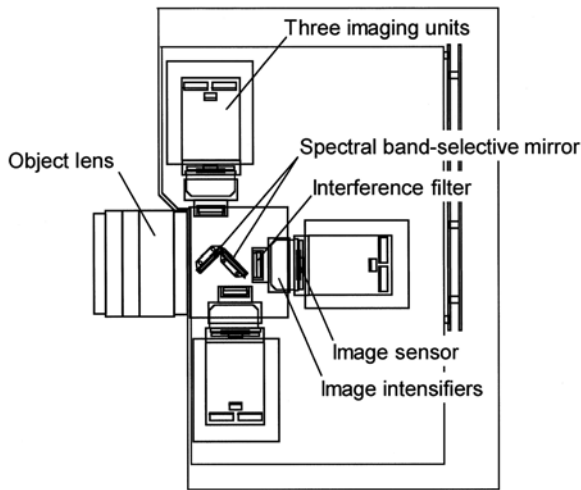


Fig. 3 High-speed multi-spectral video camera

3.2 混合気形成解析

混合気形成の解析には、噴霧挙動の観察と局所混合気濃度の計測を行った。噴霧挙動は、前記高速運転可能な可視化エンジンを用い、所定タイミングにてストロボ光を噴霧に当て、噴霧粒子からの散乱光により観察した。ストロボ光（8J、閃光期間20 $\mu$ s）は光ファイバを用いて筒内に導入し、撮影には小型CCDカメラ（7、41万画素）をエンジンブロックに内蔵し、燃焼室に近設することで、視野範囲、画質の向上を図った。なお、カメラの耐熱性確保のため、CCDカメラ外周を空冷した。噴霧挙動の観察は、ファイアリング、モータリング両条件にて実施可能であるが、散乱光撮影では蒸発噴霧の確認が不可能なため、点火時期近傍の噴霧挙動観察ではモータリングにて実施し、噴霧粒子からの散乱光を強めた。

混合気濃度の計測には、点火プラグのスカート部にサンプルパイプを設置し、高速FID（堀場製作所製、MEXA-1110RFR）を用いた筒内ガスサンプリングにより、点火プラグ周りの混合気濃度を計測した。但し、FIDの応答性（ $T_{90} = 2ms$ ）と配管長によるガスの輸送遅れは、高速運転ほど影響が大きくなることから、高速域での解析では絶対濃度の判定は困難と判断し、相対的な比較解析に供試するにとどめた。

評価条件をTable 2に示す。本コンセプトの成層混合気形成法にて重要要素である噴霧貫徹力の影響を解析するため、燃料噴射圧を本コンセプトエンジンにて採用されている13MPaと、低圧噴射として8MPaの2条件にて解析した。

Table 2 Experimental condition

Revolution speed	1200r/min	3000r/min
Load rate	20%	32%
Fuel pressure	8, 13MPa	

4. 点火プラグ周り混合気形成

初めに、点火プラグ周りの混合気形成の解析結果を示す。点火せずモータリング状態にて、燃料噴射のみを実施し、噴霧挙動観察、プラグ周り混合気濃度計測を行った。点火プラグへの噴霧到達挙動のサイクル間バラツキをFig. 4に、高速FIDによるプラグ周り混合気濃度のサイクル間バラツキをFig. 5に示す。噴霧は写真左側に位置するインジェクタより噴射された後に、ピストンキャビティの底面及び対向壁面に沿って点火プラグ側に移動し、キャビティより飛び出して点火プラグに到達する。平均的な挙動が点火プラグギャップ部に到達する所定のクランク角度にて、噴霧挙動を同期撮影し、30サイクルの噴霧輪郭を重ね書きした。プラグ周り混合気濃度は、プラグ部に噴霧が到達すると同時に濃度が上昇し、拡散が進むにつれて濃度が低下し、その後飽和する傾向を示す。図中のハッチング部が点火期間に相当する。

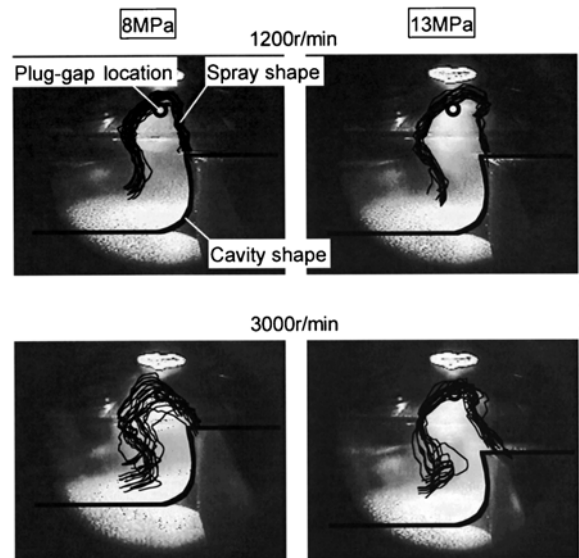


Fig. 4 Cyclic variations of fuel spray behavior



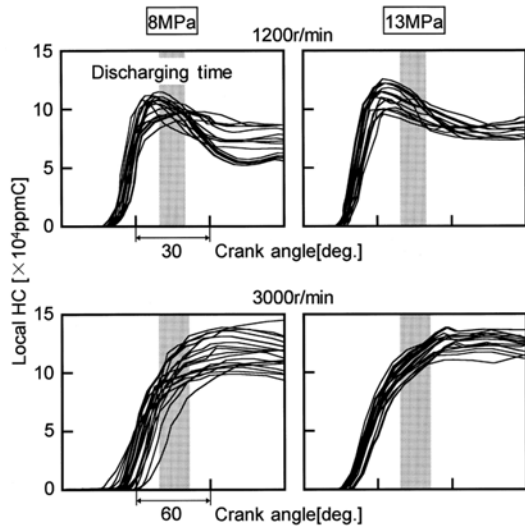


Fig. 5 Cyclic variations of fuel concentration at spark plug-gap

低速の1200rpmでは、燃料噴射圧が8MPaまで低圧化してもサイクル間バラツキに有意差はなく、点火時の混合気濃度の安定化が実現されている。対して、3000rpmにおいては、13MPaでは低速域と同等の安定性であるのに対し、燃料噴射圧を低圧化すると点火プラグへの噴霧の到達挙動にサイクル間バラツキが生じ、点火時の混合気濃度の変動幅が増大し、安定性が悪化することが分かる。

本供試エンジンが、噴霧の貫徹力とピストンキャピティ形状により混合気を点火プラグに誘導する成層化コンセプトであるため、筒内に生じるガス流動が外乱となり、噴霧挙動を阻害するものと思われる。そこで、筒内に発生するガス流動を、数値計算により解析した。数値計算により求めた、噴射弁と点火プラグを含む筒内縦断面の速度ベクトル分布と、プラグギャップ部に於ける噴霧、及びガス流速の時間変化をFig. 6に示す。ベクトル分布は、ピストンキャピティから噴霧が飛び出すタイミングの結果である。噴霧の貫徹力によるピストンからの上昇速度は、おおむね燃料噴射圧により決定するため、回転数にかかわらず一定である。一方、エキゾーストから点火プラグに向かうガス流動は回転数に依存し、高速化に伴い増大するため、噴霧ベクトルに近接することとなる。つまり、ガス流動が噴霧挙動に影響し、プラグ周り混合気形成の安定性を悪化させる要因となる。このことから、高速化に伴い増大すると共に、潜在的に変動成分を持つガス流動への口バラスト性確保のためには、噴霧の貫徹力を上げうる高噴射圧化が有効な一手段といえる。

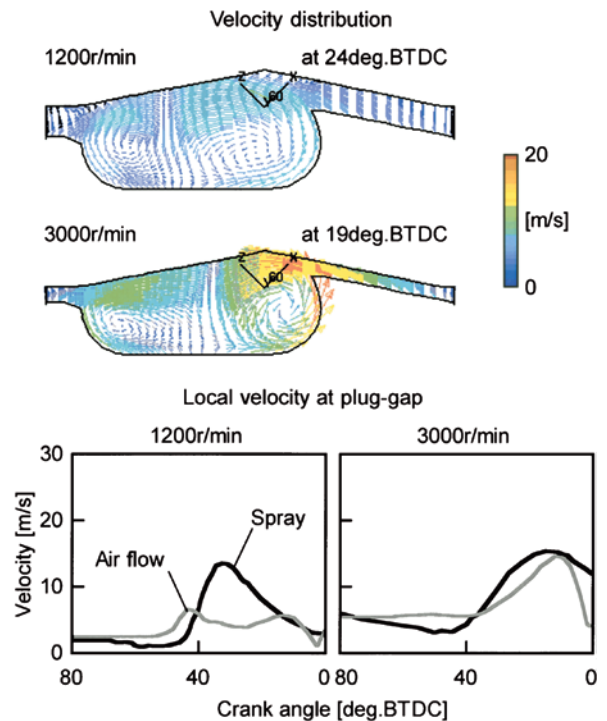


Fig. 6 Calculated flow field structure at 13MPa

## 5. 燃焼特性

### 5.1 燃焼変動

次に上記混合気形成の違いによる燃焼への影響解析として、高速域での熱発生挙動をFig. 7に示す。各噴射圧の燃焼サイクル中、高図示平均有効圧 (IMEP) サイクル、低IMEPサイクルの代表5サイクルの熱発生率、発生熱量を重ね書きしたものである。噴射圧低下によるプラグ周り混合気濃度の安定性悪化の影響として、燃焼変動が増大し、特に初期燃焼の変動が増大していることが分かる。着火性を含む初期燃焼への影響としては、プラグ周り混合気濃度以外にガス流動によるアーク流れ、火炎核移動等の影響も考えられるが、今回の評価条件では、13MPaの方が噴霧自身により生成されるガス流動によりプラグギャップ部の速度ベクトルは増大していることから、ガス流動より混合気濃度の変動が支配的に初期燃焼の変動に影響したものと考えられる。

また、低圧噴射時では燃焼変動が増大すると共に、噴射圧13MPaに比べ熱発生量が低下し、燃焼効率が悪化していることが分かる。そこで、燃焼過程の解析として、火炎伝播挙動の解析結果を次に示す。

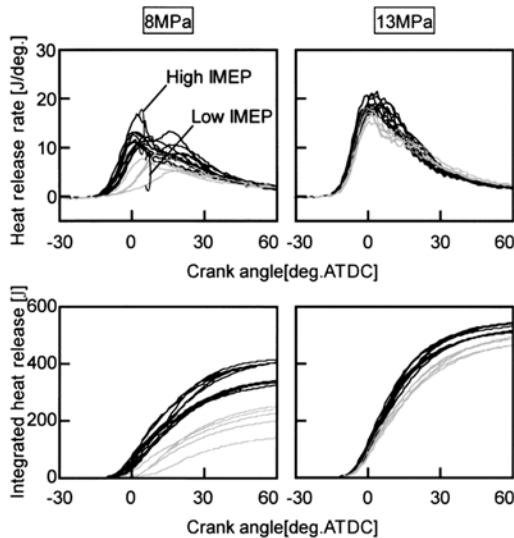


Fig. 7 Influence of injection pressure on combustion process at 3000r/min

5.2 火炎伝播挙動

火炎伝播挙動は、10deg.ATDCにて撮影した火炎映像より解析した。IMEPとの相関を解析するために、各噴射圧の燃焼サイクル中、高IMEPサイクル、低IMEPサイクルの代表5サイクルの火炎伝播範囲を重ね書きしたものをFig. 8に示す。噴射圧13MPa時では、全サイクルにてピストンキャビティのほぼ全体に火炎が伝播する。対して、低圧噴射時では、特に低Piサイクルにてインテーク側への火炎伝播が中断し、燃焼反応領域が狭くなる傾向が見られる。このことから、低圧噴射時に生じる燃焼効率低下は、ピストンキャビティ内の火炎伝播不良に起因することが分かる。

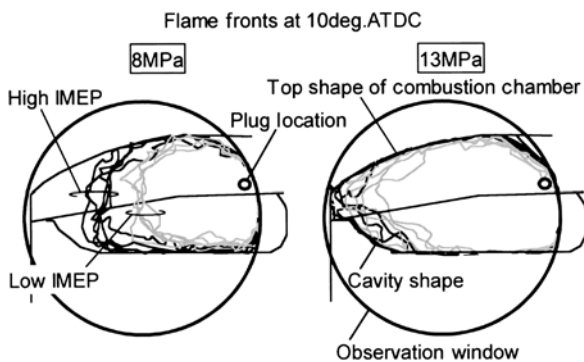


Fig. 8 Relationship between IMEP and flame propagation area at 3000r/min

5.3 煤生成・再燃焼解析

更に、噴霧貫徹力による燃焼への影響として、成層燃焼にて懸念される不完全燃焼分である煤の生成を火炎発光の観測により解析した。

火炎挙動の観測には、ラジカル発光としてCHラジカル(431nm)と、ほぼすべてを固体熱発光と見なすことができる680nmの2波長を選択し、分光撮影した。なお、CHラジカルについては近接する固体熱発光のみからなる波長の発光映像を差分処理することで、ラジカル発光のみの映像抽出を可能とした。

Fig. 9に代表的な観測結果を示す。CHラジカル発光より火炎伝播を伴う燃焼の進行がとらえられているが、火炎が伝播してからその背後でスートによる固体熱発光に基づく輝炎の形成と消滅が進行していることが分かる。

CHラジカル発光映像より、高圧噴射によりキャピティ内のインテーク側への燃焼反応領域の拡大がなされていることが分かる。また、固体熱発光映像より、低圧噴射時にはキャピティ内のプラグ側にスート生成に基づく輝炎が形成されている様子がうかがえるのに対し、高圧噴射により輝炎の発光領域がインテーク側に広がるものの、発光強度が縮小され、更にCHラジカル発光期間内に発光強度が低下する。すなわち、高圧噴射がスートの生成の抑制と共に、再燃焼の促進に効果的に作用し、有効に熱発生に寄与していることが分かる。逆に低圧噴射ではスートの生成量が多く、あるいはライフタイムが長く、熱発生に寄与しない不完全燃焼分が存在し、発生熱量の低下を招いていることが分かる。

以上の火炎挙動の有意さを生じる要因解析として、ピストンキャピティ内の混合気形成の解析結果を次に示す。

6. ピストンキャピティ内混合気形成

噴霧挙動の観察結果より、インジェクタより噴射された噴霧は、ピストン衝突時にプラグ方向に進む主混合気とインジェクタ側、つまりインテーク側への巻き戻り混合気に分流した後に、主混合気がキャピティ反り返り部によりインテーク側への進行に方向修正され、前記巻き戻り混合気へと向かう。そして、燃料噴射圧により主混合気のインテーク側への拡散挙動に差が生じることが分かった。点火直後に相当するBTDC15 Aにて撮影した噴霧挙動をFig. 10に示す。

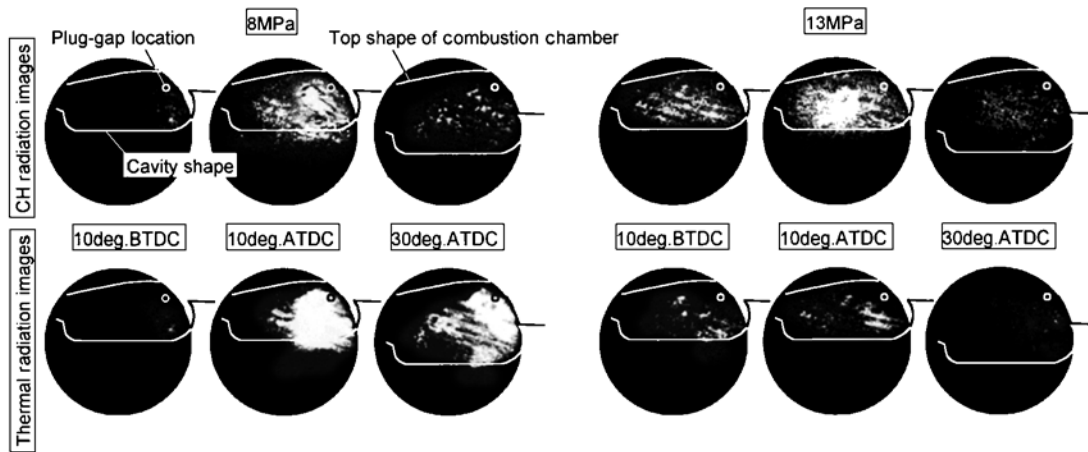


Fig. 9 Influence of injection pressure on flame behavior at 3000r/min

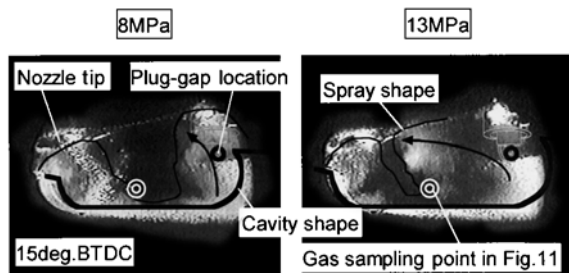


Fig. 10 Influence of injection pressure on spray behavior at 3000r/min

噴射圧13MPa時では、主混合気がインテーク側へ拡散し、巻き戻り混合気と合流するのに対し、噴射圧を下げた8MPa時では主混合気のインテーク側への拡散が弱く、点火直後においても巻き戻り混合気と分断している様子が分かる。

本可視化手法では蒸発成分の観察が不可能であるため、低圧噴射時の分断部の混合気濃度を高速FIDによる筒内ガスサンプリングにより計測した。ガスサンプルには、インテーク側ライナ部にサンプルパイプを設け、キャビティ壁面の一部切削部を介して筒内に突き出し、パイプ先端を分断部に相当する位置に配置した。Fig. 10における二重丸のポイントがガスサンプル位置に相当する。

モータリングにて計測した結果をFig. 11に示す。8MPaでは分断部の混合気濃度は、ガスサンプル位置に混合気が到達した後に上昇し、その後一定濃度に保持しているのに対し、13MPaでは平均濃度が增大すると共に、点火時期に相当するタイミング以降も上昇傾向にある。前記の噴霧挙動観察結果をふまえ考察すると、高圧噴射時では噴霧の貫徹力増大により主混合気がインテーク側へ拡散し、巻き戻り混合気と合流する

ため、キャビティ中央部の濃度が增大するのに対し、低圧噴射時では貫徹力不足により主混合気が巻き戻り混合気まで到達しえずにキャビティ中央部の濃度が低下するものと思われる。

ファイアリング時ではプラグ部を中心とする燃焼ガスの膨張により、主混合気が押し出されながらインテーク側に拡散するため、モータリングにて計測した本解析結果以上に主混合気の拡散傾向は強まるものと思われるが、前記火炎伝播、火炎挙動観察の結果にて述べた高圧噴射によりキャビティ内のインテーク側への燃焼反応領域の拡大がなされた一要因として、貫徹力増大によるインテーク側への混合気拡散の促進があるものと思われる。これに対して、燃料噴射圧低下による低貫徹力時では、主混合気のインテーク側への拡散が弱まり、キャビティ中央部に混合気濃度の連続性が欠損し燃焼反応領域が縮小すると共に、プラグ周辺での過濃域の発生によりスートの生成を招くこととなる。

以上のことから、高速域での成層燃焼の燃焼効率向上には、キャビティ内混合気の適度な拡散度の向上策として貫徹力を増大しうる高圧噴射が有効な手段であることが分かる。

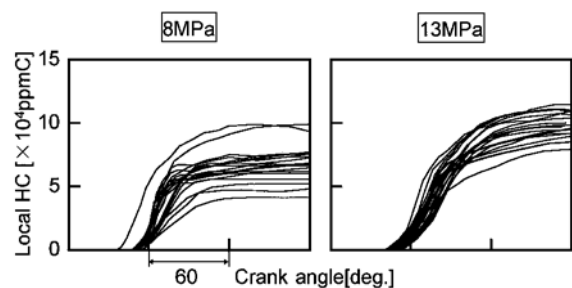


Fig. 11 Cyclic variations of fuel concentration at cavity center

## 7. おわりに

高速運転可能な可視化エンジンを開発し、噴霧挙動観察、局所混合気濃度計測、火炎伝播計測、火炎挙動観察、及び筒内ガス流動解析を実施した。その結果、噴霧の持つ貫徹力とピストンキャビティ形状によって点火プラグ周りに混合気を導くウォールガイド式混合気形成法を採用する本直噴ガソリンエンジンでは、比較的高い噴射圧（13MPa）を採用することにより、高速域での成層燃焼にて下記効果があることを明らかにした。

- (1) 高速化に伴い増大するガス流動に対し、ロバスト性ある混合気形成を確保
- (2) 点火プラグ周り混合気濃度の安定性を向上し、燃焼変動の悪化を抑制
- (3) キャビティ内の混合気拡散を促進

- (4) 過濃混合気領域の生成を抑制し、不完全燃焼分の生成を低下
- (5) キャビティ内の混合気濃度分布の連続性を保持し、火炎伝播不良による燃焼効率悪化を抑制

### < 参考文献 >

- 1) Makoto Koike et al. " Research and Development of a New Direct Injection Gasoline Engine " SAE 2000-01-0530
- 2) Mutsumi Kanda et al. " Application of a New Combustion Concept to Direct Injection Gasoline Engine " SAE 2000-01-0531
- 3) Shinji Ueda et al. " Development of a New Injection in Gasoline Direct Injection System " SAE 2000-01-1046

---

### < 著 者 >



中島 樹志  
(なかしま たつし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第1研究室  
パワートレイン分野の研究に従事



馬崎 政俊  
(ばさき まさとし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
第1研究室  
パワートレイン分野の研究に従事



齋藤 公孝  
(さいとう きみたか)  
パワトレ事業グループ 特定開発室  
パワートレイン分野の先行技術開発  
に従事



古野 志健男  
(ふるの しげお)  
トヨタ自動車(株) 第2パワートレ  
ーン開発部  
乗用車用エンジン、及び周辺要素技  
術の先行開発に従事