C121 直噴ガソリンエンジンの噴霧挙動可視化

(株) 日本自動車部品総合研究所 斎藤公孝[○], 加納政雄, 馬崎政俊
トヨタ自動車(株) 松下宗一, 郷野武

Visualization of Fuel Behavior in a direct injection Gasoline Engine

Kimitaka Saito*, Masao Kanou*, Masatoshi Basaki*, Souichi Matsushita**, Takeshi Gohno**

We developed new technique to visualize the condition of fuel-air mixture in combustion chamber of the direct injection gasoline engine clearly in real time.

In this technique, a micro CCD TV camera, optical fiber for illumination, a set of lenses and an observation window are put in spark plug and we can observe through spark plug hole.

So it is not necessary to provide with a particular observation window in an engine as before and this technique is characterized by the possibility of rapid visualization at the same time.

まえがき

省資源と地球温暖化抑制のため、自動車もCO₂排出量の削減(低燃費化)が世界的課題になっている現在、これからのガソリンエンジンに求められる低燃費化技術として、世界中の自動車メーカーが注目して開発を進めているのが直噴エンジン(Direct Injection)であり、去年世界に先駆けて日本のメーカー2社が製品化に成功している。(1),(2)

直噴エンジンは、従来の吸気通路に燃料を噴射させて吸入空気と混合してから燃焼室に送り込むという方式を進化させて、直接燃料を燃焼室内に噴射する方式で、成層燃焼の実現により画期的な燃費低減を可能としている。

直噴エンジンの成層燃焼では極めて高度な混合気制御が要求される為、燃焼室内の混合気状態の良否を診断する方法が必要である。そこで燃焼室内の混合気状態を、鮮明且つリアルタイムで可視化する新手法を開発した。本手法は、超小型CCD TVカメラ、ストロボ照明用ファイバー、レンズ群、観察窓を収納した可視化点火プラグで観察する為、従来の様にエンジンに特殊な観察窓を設ける必要がなく、迅速に可視化できる特徴を兼ね備えている。

1. 直噴ガソリンエンジン

今回トヨタ自動車(株)が開発した直噴ガソリンエンジン(D-4)は燃料を直接燃焼室内に噴射することで画期的な低燃費と高出力・ハイレスポンスという従来は相反するとされていた課題を同時に達成している。画期的な低燃費化が図れたのは、成層燃焼と言う特殊な燃焼方式の具現化に成功したことによる。

ガソリンエンジンの成層燃焼のコンセプトは古くからあるが、混合気を拡がらないように点火プラグ近傍に毎サイクル安定して形成するという高い技術的ハードルがあり実現できなかった。

表1にD-4の主要諸元、第1図に従来エンジンとD-4の構造比較を示す。D-4は燃料を噴射するインジェクタを直接燃焼室に取り付けた点が従来エンジンと最も大きく異なる。加えて深皿キャビティピストンと、燃焼室の空気流動を可変制御するスワールコントロール弁(SCV:Swirl Control Valve)によって、燃焼室内の混合気を精密に制御している。

第2図にD-4の成層混合気形成の概念を示す。圧縮行程後半に燃料噴射が実行されると、噴射された燃料噴霧はピストンの深皿キャビティのくぼみと燃焼室のスワール流によって点火プラグ近傍に誘導される。点火の瞬間には点火プラグ付近に着火しやすい濃い混合気が存在し、全体として極めて薄い混合気としながら安定した燃焼を実現させている。

Table 1 D-4 Engine specification

Type	In-line, 4-Stroke
Displacement	1998cc
Bore * Stroke	86*86mm
Valves per Cylinder	4
Compression Ratio	10.0:1
Intake Port	Helical + Straight
Fuel Pressure	12MPa
Fuel Supply	High Pressure Swirl Injector

Figure 1. Comparison of engine structure between conventional and D-4

*Nippon Soken, Inc. 14, Iwaya, Shimohasumi-cho, Nishio-shi, Aichi-ken, Japan

**Toyota Motor Corporation Toyota-cho, Toyota-shi, Aichi-ken, Japan

D-4の開発においては、今回開発した筒内混合気形成可視化装置が開発ツールとして威力を発揮した。

2. 従来可視化手法

エンジン燃焼室内のガス流動、混合気形成、燃焼、排気の一連の現象の解析は、エンジン開発においてもっとも重要な役割を担っている。燃焼室内の現象解析手法は多々あるが、特に可視化は情報量の多さや、空間的データの同時性という利点から古くから行われ、可視化エンジンが何種類か提案されている。可視化エンジンの構造を大別すると第3図に示す様にボトムビュー、サイドビュー、トップビューの3種類である。

ボトムビューはシリンダライナーとピストンを延長し、ピストンの頂面に観察窓を設けて、延長ピストンの中間部分に配置したミラーを通して燃焼室を下から覗く手法である。この手法はBowditchシステムと呼ばれ、GMの研究所で開発された。ボトムビューはヘッド側の燃焼室を全く変更しない為現在も広く使用されているが、D-4のようにピストンにキャビティが有る場合には適用が難しい。

サイドビューは透明ガラスシリンダをブロックに埋め込み、燃焼室を側方から覗く手法である。筆者らはこの手法でこれまで多くのエンジンを可視化した経験を持つが^{(3),(4)}、ピストンとガラスシリンダの熱膨張差、シール性等の問題で長時間の運転に課題を残している。

トップビューはエンジンヘッドの一部に観察窓が設けてあって、燃焼室を上方から観察する手法であるが、最近のガソリンエンジンの多くは頭上4弁式が多く、この手法の適用は困難になっている。

尚可視化エンジンに要求される項目としては

- (1)燃焼室形状、バルブ配置など実エンジンに忠実な形状を保っていること。(整合性)
- (2)長時間安定した観察ができる。(運転性)
- (3)観察視野が広く鮮明に観察できる。(観察性)
- (4)取扱いが容易で安全性が高い。(保安性)

が有るが、過去に提案されている可視化エンジンはいずれも上記条件を十分満足しているとは言い難かった。更に可視化エンジンでは、設計・製作・調整期間を含めると、可視化の構想から観察まで3~6ヶ月間を要するという課題があった。そこで今回の直噴エンジンの可視化では、実エンジンの構造を変更することなく迅速に燃焼室が可視化できる手法を開発することにした。

3. 新可視化手法

実エンジンの構造を全く変更しないで燃焼室内を可視化する為には、点火プラグを装着するプラグ装着穴を利用する手段に限られる。D-4のプラグ装着穴部にはM14のネジが形成されていて、点火プラグはそのネジを用いて燃焼室に装着されている。プラグネジM14(外径14mm)では、ネジの山・谷形成部を考慮すると利用可能な径は $\phi 12\text{mm}$ の範囲に限定される。今回の新可視化手法は、点火プラグ内部の $\phi 12\text{mm}$ に収納できるよう開発された。

なお限られた穴径から内部を可視化する装置として、ファイバースコープ等がある。筆者らも最初はファイバースコープ(照明機能付き)を用いたが、観察画素分解能がファイバーの本数(通常数万本)で限定されて要求を満足する鮮明な映像(数十万画素)が得られない為断念した。

第4図に今回開発した超小型カメラ内蔵の点火プラグを示す。通常点火プラグはハウジングボディの内部に絶縁碍子と中心電極が収納されるが、絶縁碍子と中心電極のかわりにCCD TVカメラ、ストロボ照明用ファイバー、レンズ群、石英製観察窓を収納した。

Figure 2. Fuel spray behavior in the piston cavity at compression stroke in D-4 engine

Figure 3. Conventional observation in the cylinder

Figure 4. Fitting of TV camera to spark plug

D-4の燃焼室観察では、本可視化装置装着により点火機能が失われるが、燃料噴射から点火までの混合気形成のプロセス解析が主目的であった為、問題にはならなかった。

第5図に本可視化装置の実エンジン装着図状態を示す。ストロボ照明用ファイバは2万5千本で構成されていて、TVカメラを取り囲むように配置した。ピストンは86mmの範囲で上下運動を繰り返す為、カメラ前方のレンズ群は、深い焦点深度と上死点付近で燃焼室全体が観察できる広い視野角を満足するよう選定し鮮明な映像を得た。観察窓は石英製であるが燃焼室側を凹形状にしレンズ効果を付加し視野角を上げた。特に苦心したのは、ファイバから照射されたストロボ光の観察窓端面反射とピストンハレーションの処置で、試行錯誤の結果、適度な拡散を与えて対処した。超小型カメラは直径7mmで、有効画素数41万画素、被写体照度200/20ルクス（標準/最低）、1/4インチカラー単板CCD（東芝）を使用した。ストロボ光源はキセノンタイプ（菅原）で、1フラッシュ当たりのエネルギー8J（170ルクス/秒）、閃光時間12~25 μ secを光ファイバーで転送した。

本可視化装置では、カメラの撮影方向とファイバからの照明方向が同方向であるため、噴霧粒子の前方散乱光を撮影する構成となる。ここでミ-前方散乱光強度Eは照明強度を E_0 とすると、

$$E = NK \pi a^2 E_0$$

N:粒子数, K:散乱係数, a:粒子半径

で表され、粒子径が小さくなるほど前方散乱強度は低下することになる。今回使用のキセノン光源強度、CCD TVカメラの最低被写体照度、ファイバの光転送損失から見積もると、本可視化で撮影できる噴霧の最小粒子径は0.3 μ m程度で、それ以下の燃料粒子や気化した成分は観察されない。

撮影装置のブロック図を第6図に示す。噴射弁を制御するエンジン制御コンピュータより噴射信号を分岐し、所定の時間遅れのタイミングでストロボを発光させる。この時ストロボ発光と同期して超小型TVカメラの映像信号をデジタルのフレームメモリにホルドし、ストロボ発光による映像のちらつきを無くした。ストロボの発光タイミングを、遅れ時間一定とすると目的の時期における噴霧挙動が観察でき、遅れ時間をスイープすれば噴霧挙動のスロー撮影が可能となる。ストロボ同期ホルドされた画像は市販のVTR、モニタで記録・再生される。本可視化装置を用いれば、燃焼室内の噴霧挙動をリアルタイムで鮮明に可視化できる。

4. 燃焼室混合気挙動観察結果

第7図にD-4燃焼室内の混合気挙動の観察結果を示す。圧縮行程後半で噴射された燃料はピストンキャビティの側面に沿って点火プラグ方向に誘導され、拡散しながら移動の様子が可視化できた。点火時にはプラグ近傍に濃い混合気が存在し、狙い通りの成層化が確認できた。また点火直前の混合気のA/F(空気と燃料の比率)を多点ガスサンプル法により計測した結果、第8図に示すようにプラグ近傍にはA/F10~20の濃い可燃混合気が存在し、その周辺はA/F50~100と超希薄状態になっていて、燃焼室内の混合気が狙い通りの成層状態になっていることも確認できた。

D-4ではエンジンの運転条件に応じてSCV開度を精密に制御することで、最良な成層燃焼を実現している。第9図は1200rpm-1/4負荷条件のSCV開度とPMi(図示平均有効圧:燃焼良否の指標)の関係を示すが、SCV開度35%で最良の成層燃焼が実現できている。そこでSCV開度をパラメータとして燃焼室内の混合気挙動を観察した結果、第10図に示すようにSCV開度0%ではスワールが強過ぎ、点火時には混合気がプラグ下流で大部分が拡散し、良好な成層状態が実現できていないことが判った。逆にSCV開度100%ではスワールが無い為、混合気はピストンキャビティに衝突後キャビティから洩れて燃焼室内に拡散し、プラグに誘導出来ていない事が判った。

Figure 5. Photographic system to observe fuel behavior in the cylinder

Figure 6. Block diagram of the strobe synchronized TV-photographic system

Figure 7. Observation result of fuel behavior in the cylinder

Figure 8. Mixture distribution by in-cylinder multi gas sampling

Figure 9. Relationship between SCV open ratio and PMi

5. 噴霧挙動のサイクル間変動

筒内混合気形成のサイクル間変動は内燃機関においては避けられない問題で、トルク変動やリーンリミットとの関係からよく議論されている。筒内直噴においても筒内混合気のサイクル間変動は燃焼の安定性に関わる重要な問題で、現状を把握する必要がある。

噴射弁から噴射される噴霧の評価として、第11図に示す様に、テスト容器内で所定の圧力・温度条件にして噴霧観察する方法がよく用いられている。

第12図はテスト容器内で噴射した噴霧と実エンジンの噴霧のサイクル間変動の評価として、噴射1.5ms後の噴霧形状を比較した結果である。試験は同一噴射弁を使用し、噴射量、噴射圧、駆動周波数を同じにした。観察の結果、テスト容器内の噴霧は毎サイクル安定しているのに対し、実エンジンではサイクル間変動が見られた。実エンジンでは噴射弁にエンジン振動、燃料圧変動、空気流動のサイクル間変動などの外乱の影響が加わる為、噴霧にサイクル間変動が生じているものと考えられる。

以上の結果よりテスト容器で安定した噴霧状態が得られたとしても、その安定性が実際のエンジンの燃焼室内でも保証できるとは限らないことが今回開発した可視化手法により明らかにすることができた。特に直噴エンジンの燃焼は混合気状態に敏感に反応する事から、噴霧可視化評価はテスト容器の観察より実エンジンでの観察の方が実用上の重要度が高いといえる。

尚D-4ではインジェクタの噴霧角、噴射方向、密度分布、ペネトレーション等の噴射弁製造の公差管理、エンジン側のインジェクタ取付位置やポート形状の公差管理をし、混合気のサイクル間変動を実用上問題のないレベルにしている。

6. まとめ

直噴ガソリンエンジンの燃焼室内の混合気状態の良否を診断する技術として、超小型CCD TVカメラによる点火プラグ穴からの可視化手法を開発した。

本手法をトヨタD-4に適用し、以下の知見を得た。

- (1) 圧縮行程後半で噴射された燃料はピストンキャビティの側面に沿って点火プラグ方向に拡散しながら誘導され、点火時にはプラグ近傍に濃い混合気が存在し、狙い通りの成層化が確認できた。
- (2) SCV開度を精密に制御することで、最良な成層燃焼を実現している。
- (3) 噴霧可視化評価は、テスト容器の観察より実エンジンでの観察の方がエンジン開発には有効である。

参考文献

- (1) J. Harada et al., "Development of Direct Injection Gasoline Engine" SAE Paper 970540
- (2) Y. Iwamoto et al., "Development of Gasoline Direct Injection Engine" SAE Paper 970541
- (3) K. Saito et al., "Analysis of Oil Consumption by Observing Oil Behavior Using a Glass Cylinder Engine" SAE Paper 892107
- (4) K. Saito et al., "A New Method to Analyze Fuel Behavior in a Spark Ignition Engine" SAE Paper 950044
- (5) 齊藤公孝他, E F I エンジンの燃料挙動観察, 可視化情報, Vol.15-Suppl.No.1(1995.7)

Figure 10. Relationship between SCV open ratio and fuel spray formation

Figure 11. Schematic diagram of fuel injector bench test

Figure 12. Comparison of fuel spray formation between injector test bench and actual engine