シュリーレン像の画像処理による エンジン筒内混合気分布の解析*

小塚 一宏**, 小笹 俊博***, 河村 清美***

Study of Mixture Formation in Engine Cylinder by Image Analysis of Schlieren Observation

Kazuhiro KOZUKA, Toshihiro OZASA and Kiyomi KAWAMURA

ABSTRACT

A single cylinder visualization engine with the TCC (transparent collimating cylinder) was applied to the study of a direct-injection gasoline engine. Fuel sprays, mixture formation and combustion process in the cylinder were observed using the schlieren method. The schlieren images were analyzed by image analysis technique. The shapes of the fuel spray are drastically changed with the injection timing; namely oval shaped when injecting during the suction stroke, conical shaped when injecting near BDC, and bell shaped when injecting during the compression stroke. The fuel/air mixture formations also change with the injection timing. When the injection timing is late, the mixing of fuel and air is also late and the luminous region in the schlieren image of the mixture becomes clear. In the case of the injection timing of 60 deg. before TDC, the injected fuel spray impinges on the top of the piston and the fuel/air mixture exists around the top of the piston, so that miss fire and abnormal combustion occur.

Keywords: Visualization, Schlieren, Image processing, Direct-injection gasoline engine, Spray

1. まえがき

近年、地球環境の改善、特にCO₂削減が世界的に大きな課題になっている。1997年に日本で開催された京都会議以来、各界でCO₂削減のための取り組みが議論されている。自動車業界に課せられた課題としては、車両の燃料消費率改善が挙げられる。車両の燃料消費率改善のためには、エンジンの燃料消費率改善、車両軽量化などが重要項目である。特にエンジンの燃料消費率の改善には強い要望が寄せられている。

これに対して、1996年に三菱自動車㈱からGDI、1997年にはトヨタ自動車㈱からD-4と称する直噴ガソリンエンジンが開発され市販車に搭載された^{1),2)}。その後、日産自動車㈱からもNEO-Diと称する同種のエンジンが開発され搭載車両が販売されている³⁾。市販には至っていないが、欧米の自動車メーカーでも同種のエンジンの開発が行われている様子であり、今後の自動車用ガソリンエンジンの多くがこの直噴ガソリンエンジンになっている

くものと予想される。

これらの直噴ガソリンエンジンでは、燃料噴射弁によって燃料が直接的にエンジンのシリンダ内に噴射される。噴射された燃料はシリンダ内で蒸発し周囲の空気と混合して可燃混合気が形成される。このエンジンでは燃料消費率向上のために部分負荷域は希薄混合気の燃焼が行なわれる。過去にも燃料消費率向上のために希薄燃焼を行なうエンジンが開発された⁴⁾。しかし、それらのエンジンでは希薄混合気を予混合状態で供給するため、点火可能な空気・燃料混合比（以下A/F）の上限が狭く燃料消費率の改善もそれほど大きくなかった。直噴ガソリンエンジンでは燃料をシリンダ内に直接噴射するので、点火栓の周りに可燃混合気を形成することが可能であり、これによってシリンダ内の平均A/Fを大幅に希薄化することができる。そのため、燃料消費率も大幅に改善する。ただし、シリンダ内の混合気形成が重要であり、適切な混合気形成できないと、大幅な希薄燃焼は実現できない。そのため、直噴ガソリンエンジンの開発ではシリンダ内にいかにして理想的な混合気を形成するかが鍵である。そして、この混合気状態の把握のために混合気状態の観察が不可欠である⁵⁾。

* 原稿受付 1999年6月5日

** 正会員 ㈱豊田中央研究所

*** ㈱豊田中央研究所

このような背景に基づき、本研究ではシリンダ内の混合気状態を把握する目的でシュリーレン法によって混合気領域を撮影し、この画像を解析して混合気領域を明確化することを試みた。撮影には、噴霧写真は16 mm 白黒フィルム、燃焼写真は16 mm カラーフィルム（共にKodak 社製、感度 ASA 400）を用いた。

2. 実験装置と実験条件

2.1 光学系

実験で用いた光学系の概要を Fig. 1 に示す。シュリーレン光学系は一对の凹面鏡で構成した。光源には全波長発振のアルゴンイオンレーザを用い、凸レンズで光束拡大した。シュリーレン法の場合、単一波長特性を利用する訳ではないので、全波長発振のアルゴンイオンレーザを光源としても問題はない。ナイフエッジとして、噴霧観察時は直径6 mm の、燃焼観察時には直径9 mm のリングエッジを用いた。撮影には高速度カメラ（NAC：16 HD）を用いた。撮影コマ速度は4800 コマ/秒である。

2.2 供試エンジンと特殊円筒レンズ

供試した可視化エンジンを Fig. 2 に示す。エンジンには試験用単筒エンジンを用いた。シリンダ横方向からのシュリーレン観察を行なうために、シリンダの上部に厚さ42 mm の特殊円筒レンズ（transparent collimating cylinder, TCC^(6),7)）を組み込んだ。この特殊円筒レンズの概観と平行光を入射した時の光路を Fig. 3 に示す。このレンズの内面は円筒であるが外面は特殊形状になっており、平行光が入射するとレンズ内およびレンズ出射後

Fig. 3 Cross-sectional view of the TCC and the path of light rays incident to the cylinder

Fig. 1 Schlieren system

Fig. 2 Schematic diagram of the visualization engine

とも光の平行性が維持される。

本研究では、既報告の石英ガラス製 TCC[®] と同等の表面精度をもつアクリル製 TCC を用いた。アクリル製 TCC は、表面にガソリンが付着しても表面精度が劣化することはない。また、撮影に要する短時間（約 30 秒／回）の発火運転に対しては使用上問題なく、繰り返して使用できる。

2.3 実験条件

燃料噴射にはスワールノズル噴射弁を用いた。噴射弁の取り付け位置は、観察面から見てシリンダ中心から右に 9 mm、後ろに 25 mm の位置とし、シリンダヘッド面との角度を 40° とし傾けて取り付けた。さらに噴射弁の噴口は噴射弁中心軸に対して 20° 傾いているので、燃料はシリンダヘッド面に対して 60° の角度で噴射される。噴射弁の開弁圧力は 6 MPa とした。

実験で用いた可視化エンジンの仕様と実験条件を、それぞれ Table 1 および Table 2 にまとめて示す。混合気観察実験はモータリングで行った。

Table 1 Specifications of the visualization engine

Bore	83 mm
Stroke	85 mm
Displacement	459.9 cm ³
Compression Ratio	9.5
Combustion Chamber	Disc Shape
Fuel Injector	Injection Pump & Swirl Nozzle
Heating	Hot Water and Electric Heater
Fuel	Gasoline
Ignition	Spark Ignition
Swirl Ratio	2.6
TCC	Acrylic Plastic
Inner Radius	41.5 mm
Maximum Thickness	25 mm
Height	42 mm

3. エンジンシリンダ内の混合気状態

3.1 撮影例

エンジンシリンダ内の混合気状態をシュリーレン撮影した代表例を Fig. 4 に示す。図の上部に撮影されているのはエンジンのフライホイールに刻まれたクランク角度であり、シュリーレン像がどの時点で撮影されたかを示すものである。下部の像がシュリーレン像であり、この像の上端はシリンダヘッド下面、下端はピストン頂面である。ただし、特殊円筒レンズの高さは 42 mm なので、ピストン頂面が 42 mm よりも下がると像の下端は特殊円筒レンズの下端が撮影されることになる。シュリーレン像の左右が白く見えているのは、特殊円筒レンズの加工精度が不十分で光学特性の悪い部分があるためである。従って、シュリーレン観察はこの部分を除いた領域で行なうことになる。燃料噴霧は光をさえぎるので黒い像として現われる。噴霧が蒸発して気体になると密度が周囲空気よりも大きくなるので、平行光が屈折されナイフエッジで遮光されないため白く見える。

3.2 噴射開始時期に対する噴霧・蒸発挙動

3.2.1 シュリーレン撮影像

噴射開始時期を変化させて燃料噴霧とその蒸発過程を

Table 2 Engine operating conditions

	Spray Observation	Combustion Observation
Speed	13.33 1/s (800 rpm)	13.33 1/s (800 rpm)
Air Fuel Ratio	25	22
Volumetric Efficiency	65%	56%
Injection Rate	19 mm ³ /cycle	19 mm ³ /cycle
Spark Timing		20 deg. BTDC

Fig. 4 Representative photograph of the image recording

シュリーレン観察した。代表的なシュリーレン像を Fig. 5 に示す。この図では4種類の噴射開始時期に対して、噴射終了直前と圧縮行程の一部（上死点前 45° クランク角度：以後 45° BTDC と表示）の像を示している。噴射開始時期 20° BTDC における噴射終了直前（ 12° BTDC）の像も示した。また、同時に行った筒内圧力の測定結果とこれに基づいて計算した温度履歴を示した。

これらのシュリーレン像では前節で述べたように特殊円筒レンズの加工精度不良や表面のよごれ等のため、光学的ノイズが多く鮮明な画像とはいえない。そのため、画像処理を行い画像の鮮鋭化を試みた。

3.2.2 シュリーレン撮影像の画像処理

本実験で撮影されたシュリーレン像では、空気のみ領域は黒く、蒸気領域はこの中で白く撮影される。そして、液体燃料噴霧領域は白い蒸気領域の中に黒く撮影される。したがって、これらの境界を画像処理で求めて領域分けを行った。2~3サイクルにわたる撮影を2回行っており、撮影像に再現性はある。

画像の鮮鋭化を行うにあたっては、まず噴霧等の写っていない像をバックグラウンドとしてデータ画像から差し引く。さらに、孤立点除去を行って小さなノイズ状の点を除く。その後、シュリーレン像の周囲の白い部分と背景の黒い部分の境界を判別し、シュリーレン像をとり出し蒸気領域とする。そして、シュリーレン像の中心部

分の黒い領域を抽出し噴霧領域とする。最後に噴霧領域と蒸気領域（この中に含まれる噴霧領域は除く）に別々の色相を与えて両者を同一画面に表示した。シュリーレン像と背景の境界を求める時には判別の「しきい値」を変えながら原画像と見比べて最も原画像をよく示す値を選択した。この値を決めた後は自動的に処理を行った。

Fig. 5 を基にして、画像処理により燃料噴霧と蒸発領域を鮮鋭化した結果を Fig. 6 に示す。この図で濃い灰色の領域は液体状態の燃料噴霧、薄い灰色は燃料が蒸発して気体になった領域を示している。以下、この図に基づいて噴射開始時期に対する噴霧と蒸発過程の挙動を記述する。

Fig. 6(A) は吸入行程の噴射（噴射開始時期： 45° ATDC）である。噴射終了直前の 52° ATDC での噴霧は吸入空気に巻き込まれて噴霧角が小さくなり、噴霧全体が丸くなっているのが分かる。その後は拡散が進み、圧縮行程の 45° BTDC ではシュリーレン像では何も観察されず、混合気が均一に分布していることが分かる。

Fig. 6(B) は下死点で噴射した場合である。この時点では吸入空気の速度が小さく、またピストンが最下点にあり噴射する空間が大きいため、噴霧形状は自由空間に噴射した場合と同様に噴霧角が大きく円錐状になっている。圧縮行程では噴霧の拡散が進み、混合気はほぼ均一に分布しているがピストンの上部やヘッド下部にやや混

Fig. 5 Schlieren images of directly injected gasoline in the cylinder in correspond with the cylinder pressure and temperature

合気の濃い部分が存在していることが分かる。

Fig. 6(C)は圧縮行程中期の噴射（噴射開始時期：90° BTDC）である。噴射終了時の噴霧形状は下死点での噴射時とほぼ同様の噴霧角で円錐状の形状になっているが、噴霧周辺での蒸発が進んでいること、噴霧が二段に分かれていることが特徴的である。圧縮行程では噴霧の蒸発が進んでいるが、混合気分布は均一とは言えずピストンの上部や燃焼室の中央部にやや混合気の濃い部分が存在していることが分かる。

Fig. 6(D)は圧縮行程後期の噴射（噴射開始時期：60° BTDC）である。この時点では噴霧角が小さくなって噴霧全体がしぼんだ形状になっていることが分かる。この現象はすでに解明されている⁹⁾。すなわち噴射雰囲気圧力が高い（ここではエンジンシリンダ内の圧力が約0.3 MPaまで上昇している）場合には、スワールノズル噴霧の噴霧シース内外圧力差が大きくなり噴霧シースが外側からの力によって押され、噴霧角が小さくなり噴霧全体がしぼんでしまうためである。さらに、シリンダ内の温度も高くなり（Fig. 5に示した温度の概算値では約450 K）、噴霧の蒸発もかなり進んでいるため噴霧全体がかなり小さくなっているのが分かる。その後、噴霧の蒸発は進んでいるが、混合気分布はかなり不均一でありピストンの上部に混合気の濃い部分が存在していることが分

かる。

Fig. 6(C)で噴霧が二段に分かれていることの理由として以下のことが考えられる。すなわち、本研究で用いたようなスワールノズル噴射弁では、間欠的な噴射が行われるので、噴射初期にはスワールノズル内のスワール流速が十分発達していない状態で噴射が行われるため、微粒化状態が良好とは言えない。このため、やや蒸発が遅れ、噴射終了時に初期に噴射された噴霧群が残っているものと考えられる。一方、吸入行程での噴射、Fig. 6(B)では、周囲温度が低いために噴射終了時では蒸発が進んでいないこと、圧縮行程後期の噴射、Fig. 6(D)では周囲空気密度が高いため噴霧の進行が遅く、噴霧全体が一体化してしまうため、二段に分かれては観察されないものと考えられる。

以上記述したように、エンジンシリンダ内のシュリーレン撮影像を基にして画像処理結果より、シリンダ内に噴射した燃料噴霧とその蒸発過程が鮮明に捉えられ、混合気形成状態が明確に把握できることが分かる。

3.3 燃焼状態

噴霧燃焼では、濃紺色の背景に白いシュリーレン像と赤い火炎の直接光が重なり、像が形成される。本実験用可視化エンジンでは、点火と噴射が同時の場合は安定に燃焼するが、噴射開始時期を進めると失火する。

End of Injection

45 deg. Before
Top Dead Center

(A)

(B)

End of Injection

45 deg. Before
Top Dead Center

(C)

(D)

Fig. 6 Modified Schlieren images of directly injected gasoline in the cylinder by image analysis techniques. (A), (B), (C) and (D) correspond to the same letters in Fig. 5.

噴射開始時期と点火時期を共に 20° BTDC とすると、比較的安定に燃焼する。この撮影結果を指圧解析結果と合わせて示したのが Fig. 7 である。わずかな前噴射の後に、主噴射と点火が同時に起こる。 18° BTDC の像は、ピストンに衝突し、ピストン頂面にそって横に延びる噴霧や混合気と、プラグギャップの放電を捉えている。 8° BTDC の像では、プラグ電極を中心に白いシュリーレン像が現れる。しかし、これが混合気か火炎かの区別はできない。TDC の像は急激な火炎伝播を示すもので、火炎の発光により、シュリーレン像は打ち消されている。中央より右に噴射された燃料がスワールに流され、左に火炎伝播する。また、強い火炎の発光は 30° ATDC まで続き、 55° ATDC ではピストントップランドから噴出するガスの白いシュリーレン像と重なっている。

一方、Fig. 6(D) に示す噴射開始時期 60° BTDC の場合は燃焼状態が異常になった。この場合のシリンダ内圧力変化を Fig. 8 に示す。Fig. 8 で最大圧力値の高い B の場合は正常燃焼時よりも高い燃焼圧力が発生しており、一方、最大圧力値の低い A の場合は失火が起きたことを示している。この結果より分かるように、 60° BTDC 噴射の場合には 2 サイクルの失火と 1 サイクルの異常燃焼を繰り返す。

この原因を Fig. 6 に示した混合気形成状態と照らし合わせて考察すると以下ようになる。噴射開始時期が 60° BTDC とかなり上死点に近い場合は、ピストンがかなり上昇した位置に達しているため、Fig. 6(D) から分かるようにピストンの上部に大部分の混合気がかたまって存在する。また、遅い噴射開始時期(点火時期に近い)

の場合には点火までの時間が短いので、混合気の拡散および混合が十分には行われない。このため、混合気はピストン上部に留まったままの状態での点火が行われることになる。点火栓はヘッド側に取り付けられているので、混合気がピストン上部にあると点火栓付近には適切な混合気が存在しないことになり、失火してしまうことになる。失火が繰り返されると、シリンダ内に残留した混合気がすべて排出されずに残り、やや混合気が濃くなるので着火するがすぐ消滅してしまう。しかし、ピストン頂面に付着した燃料は燃焼を継続し、その次のサイクルの火種となる。サイクル B では、ピストン頂面の炎によって噴射直後の噴霧が着火するため異常燃焼になってしまう⁵⁾。

こうした状態を避けるためには噴射開始時期と点火時期とを離すのが良いと考えられるが、直噴ガソリンエンジンの開発目的は燃料消費率向上のために大幅な希薄燃焼を行なうことであり、そのためには点火栓位置に適切な混合気を形成する成層燃焼を実現する必要がある。噴射開始時期と点火時期を離してしまうと、混合気の拡散および混合が進むので成層燃焼は実現できない。すなわち、成層燃焼を実現し大幅な希薄燃焼を行なって燃料消費率を向上させるためには、噴射開始時期と点火時期とをあまり離すことなく、Fig. 8 に示したような異常な燃焼にならないようにすることが要求される。

なお、本エンジンでは Fig. 6(A), (B), (C) で明らかにように圧縮上死点前 60° クランク角度より前に噴射すると、 $A/F=22$ の希薄混合気が均質化するために安定に燃焼しなかった。

Fig. 7 Schlieren photographs of combustion and rate of heat release of directly injected gasoline in the cylinder (Both the injection and spark timings are 20° BTDC)

Fig. 8 Miss fire and abnormal combustion processes in comparison with pressure in the cylinder

本研究で示したように、頂面が単純な平面のピストンでは、噴射開始時期と点火時期を近づけた上で点火栓付近に適正な混合気を形成することは不可能であると考えられる。従って、ピストン頂面の形状、および噴射弁の位置や噴射方向の最適化が安定な成層燃焼を実現する上で重要である。そして、これらの最適化を行なっていく過程では本研究で示したような噴霧や混合気の状態を可視化し、さらに画像処理を行ない適切な判断ができる画像にしていけることが不可欠である。

4. まとめ

直噴ガソリンエンジンのシリンダ内での噴霧形状および混合気状態を調べるために、特殊円筒レンズを用いたシュリーレン撮影法を適用するとともに、得られたシュリーレン画像を画像処理によって鮮鋭化する方法を述べた。これらの方法により実際にシリンダ内に燃料を噴射した際の混合気状態を把握し、燃焼状態との関連を考察した。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、特殊円筒レンズやシュリーレン撮影に関して有益な助言を得た豊田中央研究所機械1部 藤川武敏主任研究員、論文のまとめに対して助言をいただいた同 斎藤昭則主監に対して感謝いたします。

参考文献

- 1) Kume, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, N., Akishino, K. and Ando, H.: Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engines, SAE Paper No. 960600, 1996.
- 2) Tomoda, T., Sasaki, S., Sawada, D., Saito, A. and Sami, H.: Development of Direct Injection Gasoline Engine-Study of Stratified Mixture Formation, SAE Paper No. 970539, 1997.
- 3) 石塚厚光, 矢野浩史: NEO Di ガソリンエンジン技術について, 日産技報, 第44号, (1999) pp. 5~8.
- 4) Matsushita, S., Inoue, T., Nakanishi, K., Kato, K. and Kobayashi, N.: Development of the Toyota Lean Combustion System, SAE Paper No. 850044, 1985.
- 5) Ozasa, T., Kozuka, K. and Fujikawa, T.: Schlieren Observations of In-Cylinder Phenomena Concerning a Direct-Injection Gasoline Engine, SAE Paper No. 982696, 1998.
- 6) Fujikawa, T., Ozasa, T. and Kozuka, K.: Development of Transparent Cylinder Engines for Schlieren Observation, SAE Transactions, Vol. 97, Journal of Engines, pp. 6.1714-6.1723, Paper No. 881632, 1988.
- 7) 藤川武敏, 片岡匡男, 勝見則和: 特殊円筒レンズによるエンジン筒内現象のシュリーレン観察, 日本機械学会論文集 (B編), 60巻580号, 論文No. 94-0236, (1994) pp. 331-337.
- 8) De Corso, S. M. and Kemeny, G. A.: Effect of Ambient and Fuel Pressure on Nozzle Spray Angle, Trans. ASME, April, (1957) pp. 607-615.

-18 deg. Spray & Ignition

-8 deg. Initial Combustion

TDC Flame Propagation

8 deg. Flame Propagation

20 deg. Diffusion Combustion

30 deg. Diffusion Combustion

55 deg. Diffusion Combustion

口絵9 直噴ガソリンエンジンの燃焼室内のシュリーレン写真。火炎の発光が重なっている。

(株)豊田中央研究所 小塚 一宏, 小笹 俊博, 河村 清美)

(本文 221 頁参照)