

研究報告

LIF (レーザ誘起蛍光) 法による直噴ガソリンエンジンの
燃焼変動解析

藤川武敏, 野村佳洋, 服部義昭

Analysis of Cycle-by-Cycle Variation in a Direct-Injection Gasoline
Engine Using Laser-Induced Fluorescence Technique

Taketoshi Fujikawa, Yoshihiro Nomura, Yoshiaki Hattori

要 旨

直噴ガソリンエンジンのEGR時、燃焼変動を解析するため、LIF法によるサイクルごとの混合気濃度計測を行った。混合気濃度はサイクルごとに変動しており、噴射の進角および遅角側では、点火時に特にリーン（進角側）あるいはリッチ（遅角側）な混合気が存在したサイクルで、初期燃焼期間が長くなりIMEP（図示平均有効圧力）が低下し燃焼変動が大きくなる。すなわちこの条件での燃焼変動の主要因は、点火時の点火栓部混合気濃度と言える。一方、噴射の中央値付近である適正噴射時期においては、点火栓部濃度は変動するものの、その値と初期燃焼期間、およびIMEPとの間には明確な相関は見られない。この条件でIMEPと強い相関があるのは主燃焼期間であり、燃焼変動のメカニズムは噴射時期によって異なっている。解析の結果、適正噴射時期における燃焼変動は、燃焼後半にキャビティ周辺に存在する未燃混合気量と強い相関があることが分かった。これより、この希薄混合気量を低減することが、燃焼変動改善に有効であることを明らかにした。

キーワード ガソリンエンジン, 成層燃焼, 燃焼変動, 着火, 混合気形成, レーザ, 蛍光

Abstract

The fuel mixture distribution has been measured at the spark timing and the combustion duration by the LIF technique in order to analyze the combustion fluctuation in a DI gasoline engine. It has been revealed that the combustion fluctuations under both the early and late injection conditions are dominated by the mixture concentration at the spark position and timing. On the other hand, for the best injection timing, the combustion fluctuations are strongly correlated to the unburned mixture quantity around the piston cavity during the latter combustion period. For improving the combustion fluctuations, it is effective to make a compact shaped mixture to reduce the over lean region.

Keywords Gasoline engine, Stratified charge combustion, Combustion fluctuation, Ignition, Mixture formation, Laser, Fluorescence

1. はじめに

直噴ガソリンエンジン¹⁻³⁾においては、軽負荷時に点火栓周辺にのみ可燃混合気を形成し成層燃焼を行う。このため適正な混合気が形成される安定運転領域においては、一般にポート噴射式エンジンに比べ燃焼のサイクル間変動が小さいとされている。しかし、一層厳しさを増す排出ガス規制に対応すべく、エンジンアウトにおけるNO_x排出量を低減させるた

めにEGRを増加させて行くと、この安定運転領域が狭くなるとともに、燃焼変動も大きくなる傾向がある。燃焼変動はエンジンのトルク変動の主要因であるため、車両のドライバビリティの観点から、その悪化は許容しがたい。このようなことから、EGRによるNO_xの低減と、その際の燃焼変動低減の両立が必要とされている。しかし、直噴ガソリンエンジンにおける燃焼変動に関する研究は十分とは言えない。角方ら⁴⁾は点火栓一体型の赤外吸収装置を開発

し、点火直前における点火栓近傍の空燃比と燃焼変動との関係を調べている。しかし、燃焼変動が点火直前の空燃比だけに支配されているとは限らない。またこの研究では、燃焼変動に対するEGRの影響も明らかではない。

著者らはこれまでLIF (Laser-Induced Fluorescence) 法を用いて直噴ガソリンエンジン筒内の定量的な混合気濃度測定技術を開発してきた⁵⁻⁶⁾。従来はEGR無しの条件下で、サイクル平均の画像を扱っていたが、今回EGR下の条件でサイクルごとの混合気濃度の定量化を試みた。さらにLIF法を点火前だけでなく燃焼中・後期の混合気挙動の観察へも適用した。これらの手法と筒内圧力計測とを組み合わせ、直噴ガソリンエンジンのEGR下における燃焼変動を解析した。

2. 燃焼変動の分類

Fig. 1は、EGR下において、点火時期固定で燃料噴射時期を変化させた場合の、連続する200サイクルの筒内圧波形から求めたIMEP (図示平均有効圧力) の標準偏差である。このデータは後述する可視化単筒エンジンを用いて計測したものであるため、安定運転範囲や燃焼変動の絶対値は実機とは異なるが、傾向は一致している。図から分かるように、燃焼が比較的安定している領域を挟んで進角側、遅角側どちらに噴射時期がずれても燃焼変動は大きくなる。この実験範囲からさらに噴射時期を大きく振れば、エンジンに失火サイクルが入り始め、もはや安定な運転は困難となる。一方、この安定運転領域そのものも、EGRの増加により特に遅角側から狭められ、同時に燃焼変動の絶対値も悪化してくる。

Fig. 2はA/F=27の条件で、サイクルごとの初期燃焼期間 (0~10%熱発生期間) および主燃焼期間 (10~90%熱発生期間) とIMEPとの関係を調べた結果である。図より噴射の進角側 (-70°, -68°噴射), 遅角側 (-58°噴射) のいずれでも初期燃焼期間, 主燃焼期間が共に長くなるとIMEPが低くなっている。これは初期の燃焼が遅いと、それに伴い主燃焼期間も長くなり、全体の燃焼が緩慢となって有効な出力が出なくなるためである。これに対して燃焼が最も安定している適正噴射時期 (噴射のほぼ中央値にあたる-63°噴射) においては、初期燃焼期間は非常に安定しており、これとIMEPとの間には明確な相関は

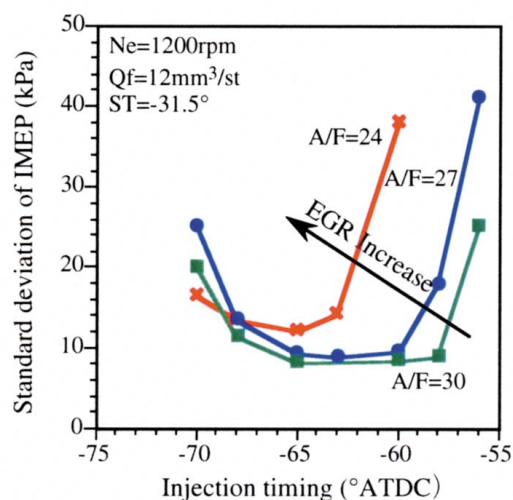


Fig. 1 Injection timing vs. combustion fluctuation.

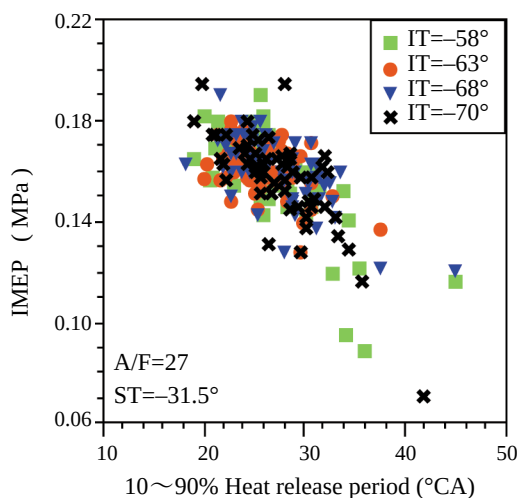
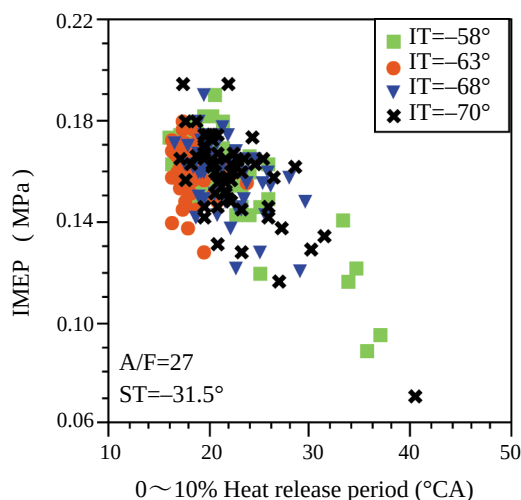


Fig. 2 Relationship between the heat release period and IMEP.

見られない。しかしこの条件でも主燃焼期間のばらつきは大きく、これとIMEPとの相関は強く残っていることが分かる。

以上のことより、同じ燃焼変動であっても噴射の進角、遅角側での現象と適正噴射時期近傍での現象は異なっているものと考えられる。そこで本研究ではこれら二つを切り離し、噴射の進角と遅角側での解析は、初期燃焼に着目して点火時期における点火栓近傍の混合気濃度と燃焼との関係を、一方、適正噴射時期付近における解析は、初期燃焼以降に着目して燃焼中～後期の混合気分布と燃焼との関係を調べることにした。

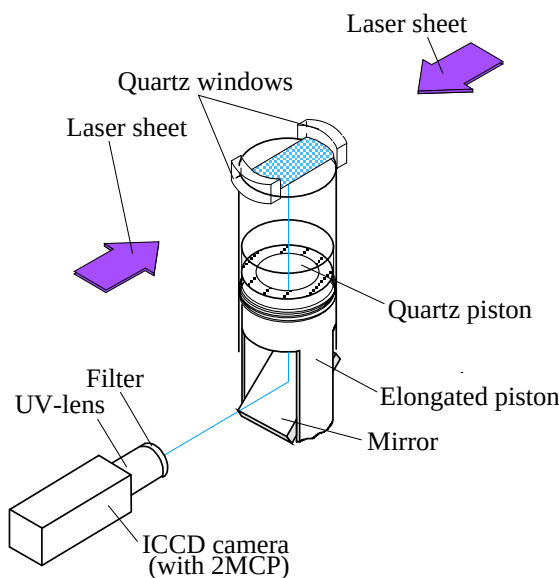


Fig. 3 Visualized engine and optical set-up.

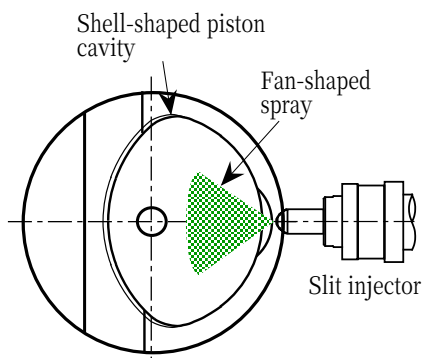


Fig. 4 Fuel spray and piston cavity configuration.

3. 実験装置・方法

3. 1 可視化エンジンと光学系

Fig. 3に実験に用いた可視化エンジンとLIF光学系を、Fig. 4に燃焼系の概略を、Table 1に可視化エンジンの諸元を示す。エンジンはペントルーフ型燃焼室に筒内噴射用燃料噴射弁、および点火栓を有する直噴ガソリン機関である。このシリンダヘッド側面と延長ピストン頂部に石英観察窓を装着できる構造とし、レーザシートの入射と筒内現象観察を可能としている。吸気ポートは定常タンプル比0.45の弱タンプルを生成するストレートポートである。燃焼系はスリットノズルによるファンスプレーとシェル型ピストンキャビティで構成される、トヨタの第2世代直噴ガソリンエンジンである⁸⁻⁹⁾。Table 2に本解析におけるエンジン運転条件を示す。

LIFの励起レーザには波長248nmのKrFエキシマレーザを使用した。レーザ光は予め二つに分けられ、それぞれシート状に成形された後、対向方向から石英窓を通して燃焼室に入射した。Table 3に実験ごとのレーザシート厚さと石英ピストンの組み合わせを示す。点火直前の混合気濃度を定量測定する際は、レーザシート厚を1mm以下とし、その位置は点火栓の接地極を含む断面とした。このために点火栓を予め2mm後退させて設置した。観察用石英ピストンは底面がフラットなタイプを使用した。この時の観察視野は直径で約60mmである。これに対し燃焼中～

Table 1 Specifications of the visualization engine.

Number of cylinders	1
Displacement volume	500 cm ³
Bore	86 mm
Stroke	86 mm
Compression ratio	7.1
Intake port	Straight ports
Steady tumble ratio	0.45
Piston cavity	Shell-shaped
Fuel supply system	High pressure slit injector
Fuel pressure	12 MPa

Table 2 Engine operating conditions.

Engine speed	1200 rpm
Injected fuel amounts	12mm ³ /st
Operation	Fired operation with EGR
Coolant temperature	80°C

後期の混合気分布を観察する際は、レーザシートはヘッド側面の石英窓の高さ（22.5mm）をカバーできる厚さとし、石英ピストン側面も透明仕上げとすることで、TDC付近であってもキャビティ内を含む燃焼室のほぼ全域にレーザ光が行き渡るように配慮した。さらに燃焼室全域を観察するために、底面を凹レンズ状に加工した石英ピストンを使用した。LIF像の撮影には高感度のMCPタイプICCDカメラを使用した。

3.2 混合気濃度の定量測定手法

LIF法による混合気濃度の定量測定のために、先に著者らはLIF強度の温度、圧力依存性が極めて少ない「蛍光剤にアセトンを用い、それを波長266nmで励起する」という組み合わせを提案し、その有効性を確認してきた⁵⁾。しかし波長266nmの光源である

Nd:YAGレーザの4倍波はパルスごとのレーザパターンと出力の変動が大きく、今回のように1ショットごとのLIF強度を問題にするような場合においては、必ずしも適切な選択とは言えない。そこで今回は励起光源として、これらの変動の少ないKrFエキシマレーザ（波長248nm）を選択し、混合気濃度の定量測定用蛍光剤にはトルエンを用いた。この際に問題となるLIF強度の温度、圧力依存性に関しては、独自に開発した手法を用いて補正を行った。補正方法の詳細は、著者らの文献⁵⁻⁷⁾を参照されたい。

4. 実験結果と考察

4.1 進角、遅角噴射時の燃焼変動

先に述べたように、この条件では点火時期近傍の混合気分布を中心に解析した。Fig. 5に噴射時期を

Table 3 Conditions for the LIF measurements.

Purpose	Fuel concentration measurements before the spark timing	Fuel and flame observation during the combustion period
Excitation laser	KrF excimer laser (248nm)	
Fuel & Tracer	Iso-octane & Toluene (5 wt%)	Iso-octane & DMA (1 wt%)
Laser sheets thickness	< 1mm	> 22.5 mm
Illuminated section	Plug ground electrode plane	Whole combustion area
Quartz piston bottom shape	Flat	Concave

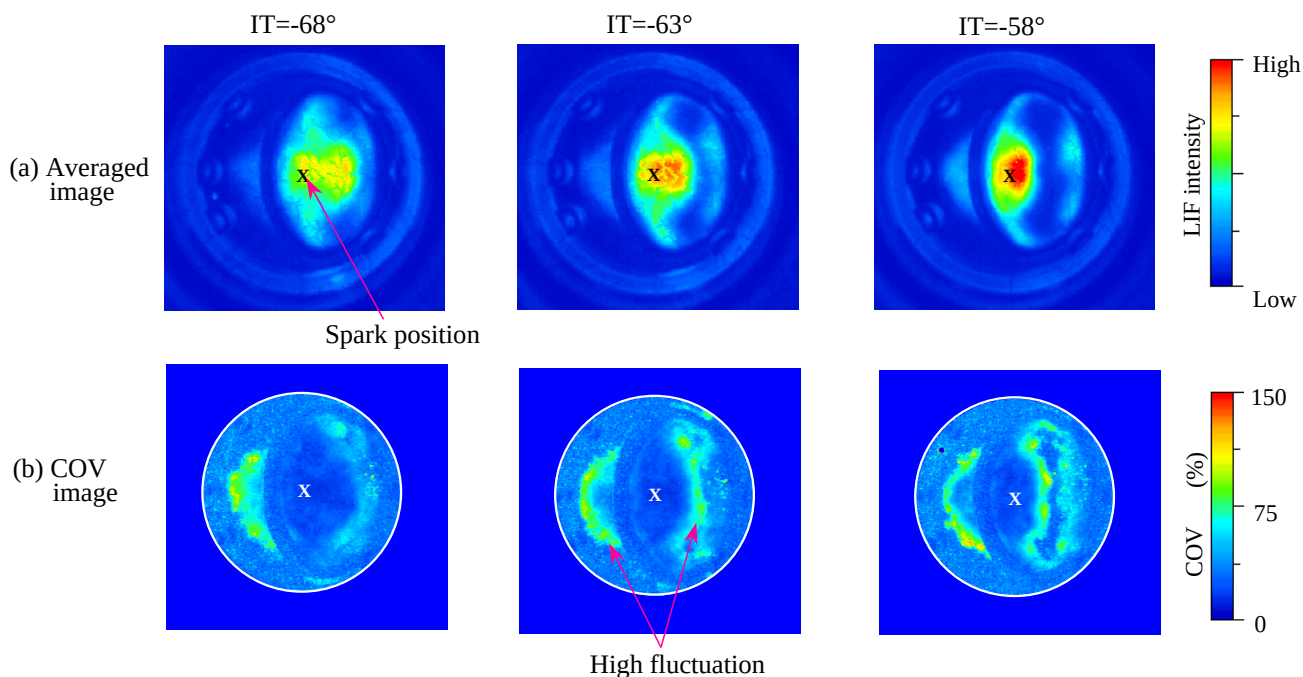


Fig. 5 LIF images of the mixture distribution at -30° ATDC. (a) Averaged image over 30 cycles. (b) COV image: Pixel by pixel value of the standard deviation of the LIF intensity divided by the mean intensity.

遅角, 適正, 進角と変えた場合の -30° ATDCにおける平均混合気分布とその変動分布 (COV-coefficient of variation) を示す。変動分布は同一条件で撮影した30画面から, 各ピクセルごとにLIF光強度の標準偏差を算出し, それを同一ピクセルの平均強度で割ったものである。Fig. 5(a) の平均混合気分布を見ると, 噴射時期が遅角側の $IT=-58^{\circ}$ においては, 点火栓は濃い混合気塊に覆われている。噴射時期を進めるに従って, この混合気塊は噴射弁側に移動しつつ, その濃度を低下させてゆく。一方 (b) の変動分布を見ると, 混合気先端部分で変動が非常に大きくなっていることが分かる。この部分は, サイクルごとに混合気が存在したりしなかったりする領域に対応する。しかし, 点火栓近傍の混合気塊の中心付近は, 先端部分に比べれば遥かに変動が少ないことが分かる。これは遅角側および進角側の噴射時期においても, 点火時期において混合気は毎サイクル点火栓部に到達していることを意味している。

次に, 点火栓近傍の混合気濃度の絶対値に着目してみる。Fig. 6に, 排気 $A/F=27$ においてLIF画像から求めたサイクルごとの点火栓部当量比と, 同時に計測した筒内圧から求めた初期燃焼期間, およびIMEPとの関係を示す。ここで混合気濃度を求めるためのLIF画像の抽出領域は, 点火栓中心電極を挟んで約 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ に設定した。また計測時期は, 火花放電の影響を避けるために, 点火の 0.5°CA 前にあたる -32° とした。図より点火栓部当量比は, 同一噴射時期でもサイクルごとにばらついていることが分かる。しかし, 適正噴射時期のほぼ中央値にあたる

-63° 噴射では, 当量比が変動しても初期燃焼期間はほとんどその影響を受けていない。これに対して噴射が早い -68° , -70° 噴射の場合, 平均的に当量比は薄い側にシフトするが, その中でも当量比がほぼ1を切るようなリーンなサイクルで初期燃焼期間が長くなり, それに伴ってIMEPの低いサイクルが現われてくる。一方噴射が遅い -58° 噴射の場合, 平均当量比は高くなるが, その中でも当量比が約2を超えるようなリッチなサイクルで初期燃焼期間が長く, IMEPが低くなる。このようなIMEPの低いサイクルが混じることが全体の燃焼変動を悪化させることになる。したがって燃焼変動は, 噴射の進角時はリーンな混合気サイクルに, 一方遅角時はリッチな混合気サイクルに, それぞれ起因していると言える。なお噴射の進み側においては, 当量比が1近辺であるにもかかわらず初期燃焼期間が長くなっているサイクルが見られる。これは全体に希薄化が進んだ混合気においては, 点火時の当量比が1であっても, 火炎伝播の期間中に混合気の希薄化が進行し, 火炎伝播不良に陥ってしまうためと考えられる。

4.2 適正噴射時期での燃焼変動

次に, 適正噴射時期近傍における燃焼変動の解析結果を示す。Fig. 2で示したように, 安定運転領域においてはサイクルごとのIMEPと強い相関があるのは, 初期燃焼期間ではなく主燃焼期間である。すなわち, この条件での燃焼変動を支配しているのは燃焼の中～後期と言える。そこでこの中～後期の燃焼が筒内のどこで起こっているのかを, 先に述べた燃焼室全域を可視化するLIF法で観察した。この実

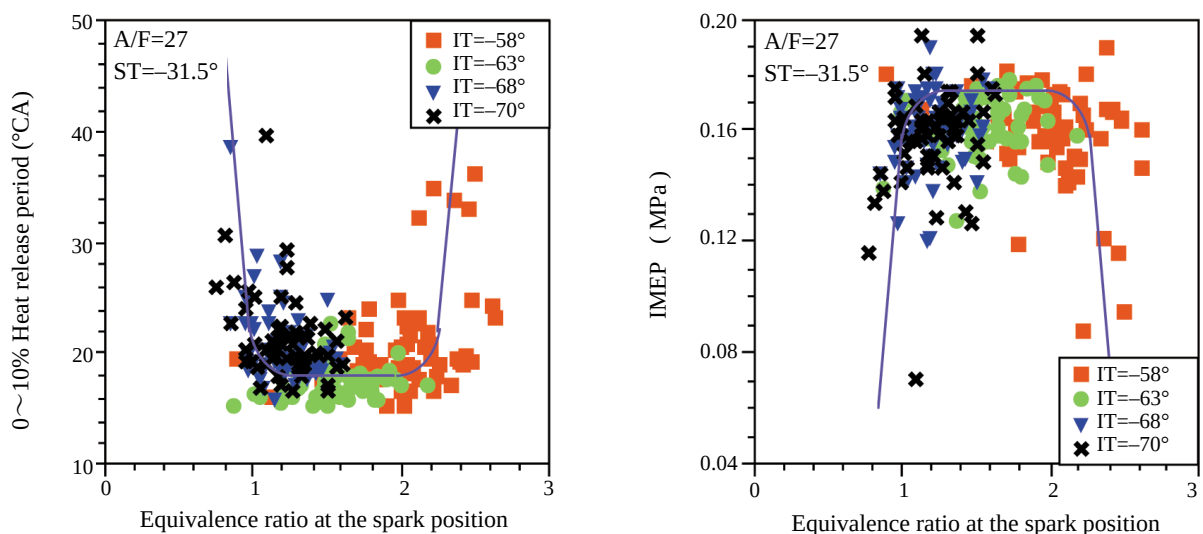


Fig. 6 Cycle to cycle variation of the equivalence ratio at the spark position and its effect on the combustion period and IMEP.

験では、蛍光強度が高いDMA（ジメチルアニリン）を蛍光剤として使用し、相対的に弱いレーザ光でも十分なLIF強度が得られるようにした。

Fig. 7に観察結果の一例を筒内圧解析結果と共に示す。なおここでは、混合気分布と燃焼との定性的な観察を目的としたため、混合気濃度の定量化は行わず、輝度も相対値として示している。図より、 -30° ではキャビティ内の点火栓近傍に明るいLIF像が見られ、ここに濃い混合気が存在していることが分かる。点火から約 20° 経った -10° では、キャビティ中心部が暗く抜けている。これは燃焼により燃料が消費され、LIF発光が見られなくなったため、この領域が既燃焼領域に対応する。このように燃焼の初期段階では、火炎は点火栓部からまず噴射弁方向に速く伝播している。そして熱発生ピークをやや過ぎたTDCでは、キャビティ中心付近の燃料はほとんど燃焼が完了し、その後火炎はキャビティ長手方向（両端部）に伝播して行く（TDC～ 30° ）。しかしこの部分の混合気はかなり希薄化が進んでいるため、 30° から 50° の間ではほとんど火炎伝播が進行してい

ないことが分かる。これは熱発生パターンとも対応しており、 30° 以降はほとんど有効な熱発生は見られていない。

Fig. 8は、火炎伝播がほとんど止まってしまうクランク角 30° において、キャビティ両端部に図に示すような抽出領域を設定し、この領域のLIF強度とIMEPの関係をサイクルごとにとったものである。LIF強度はそこに存在する燃料量にほぼ比例すると考えられる。図より、キャビティ両端部のLIF強度が高い、すなわちそこに存在する未燃燃料量が多いサイクルでIMEPが低くなっていることが分かる。言い換えれば、適正噴射時期近傍での燃焼変動は、燃焼後半にキャビティ周辺部に存在する希薄混合気量のサイクル間変動と強い相関があると言える。これより、この希薄混合気量を減らすことが、燃焼変動低減の有効な手段と考えられる。

4.3 燃焼変動改善の方法

以上の観察結果を基に、燃焼変動改善の方法について考察した。実際のエンジンでは、燃料噴射時期は適正噴射時期近傍に設定されるため、この条件に

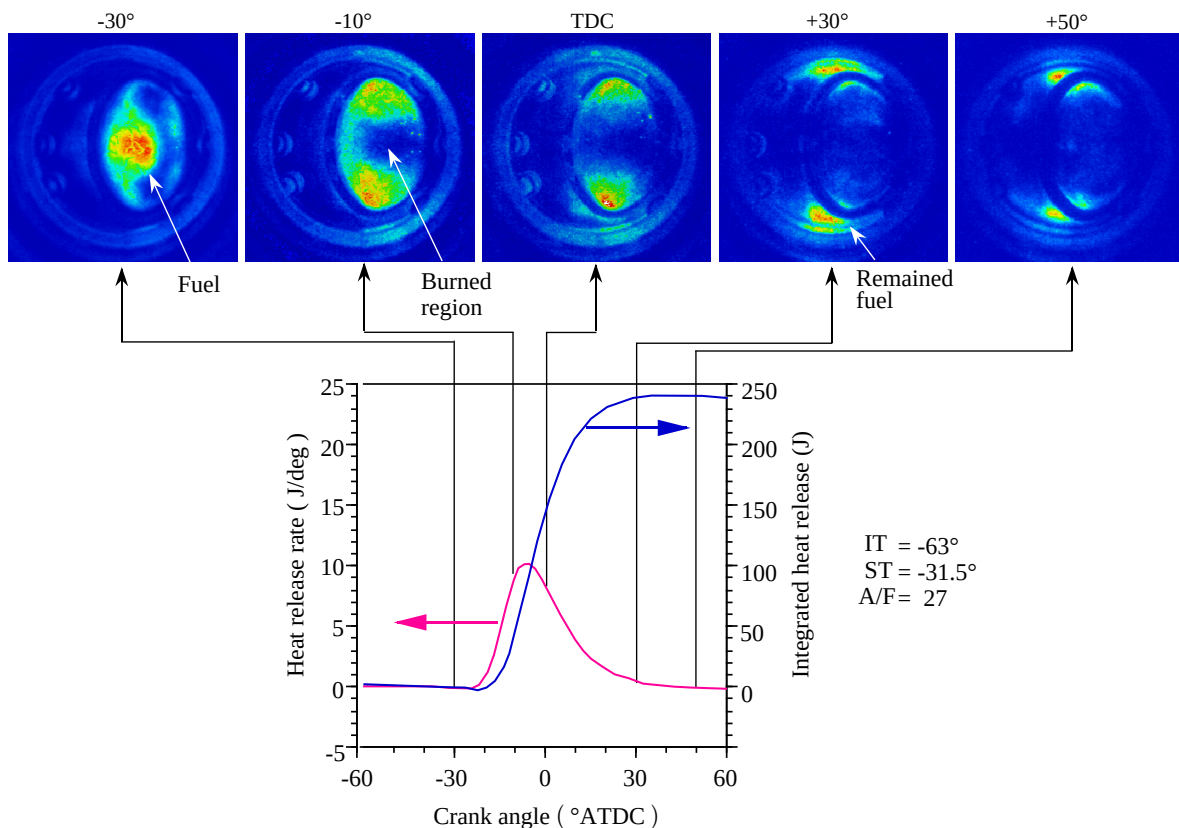


Fig. 7 LIF visualized results related to the heat release pattern.

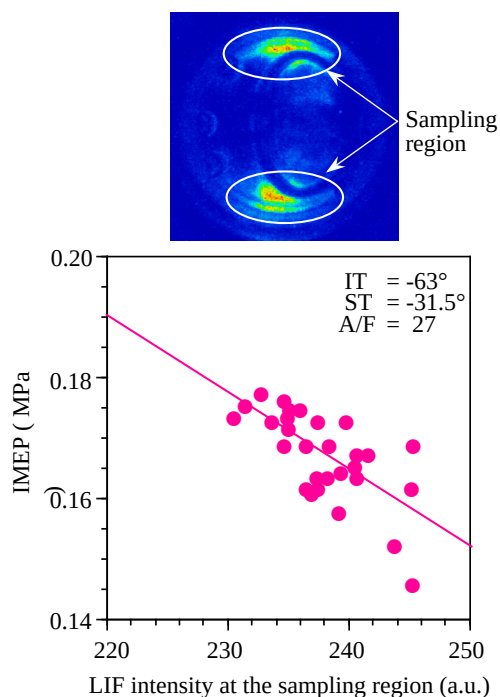


Fig. 8 Relationship between the LIF intensity and IMEP. The LIF intensity was taken at 30°ATDC.

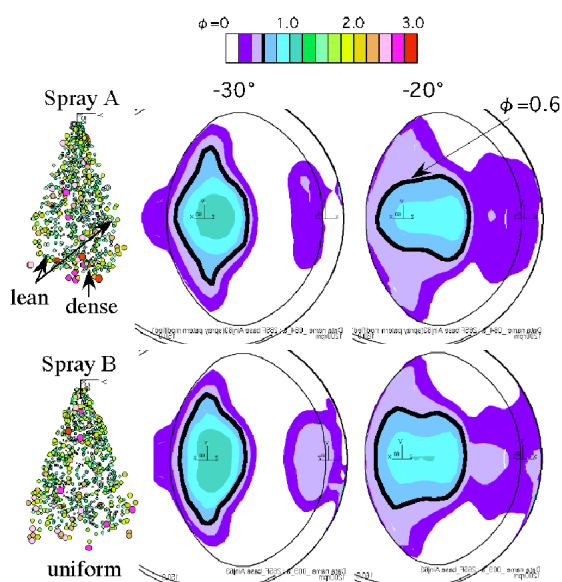


Fig. 9 Effect of spray pattern on the mixture distribution (IT=-63°ATDC).

におけるキャビティ周辺部の希薄混合気量に着目し、本号 (前出 p.19) で述べたCFD手法を用いて検討した。

Fig. 9に、噴霧濃度分布が混合気分布に及ぼす影響を示す。噴霧Aは噴霧中心部が濃く周辺部は薄い分布を、噴霧Bは均質な噴霧濃度分布を、それぞれ与えている。混合気分布の計算結果を見ると、噴霧Aの場合キャビティ両端部における希薄混合気領域 (当量比 $\phi < 0.6$) が、噴霧Bに比べ広がっている。噴霧濃度が薄い場合、噴口から同じ速度で噴射されても、その部分の噴霧は運動量を失いペネトレーションが弱くなる。噴霧Aの希薄混合気領域が広いのは、元々周辺部の噴霧濃度が薄い上に、その部分のペネトレーションが弱くなるため、混合気により拡散しやすくなってしまったためである。

Fig. 10にキャビティ形状の影響を示す。キャビティAに対してBはキャビティ両端部を狭めたコンパクトな形状となっている。この形状のため、キャビティ両端部における希薄混合気領域 (当量比 $\phi < 0.6$) が、キャビティBでは大幅に低減されていることが分かる。

以上の知見を基に、実機においても均質な噴霧濃度分布とコンパクトなキャビティの組み合わせにより、燃焼変動低減を実現している⁹⁾。

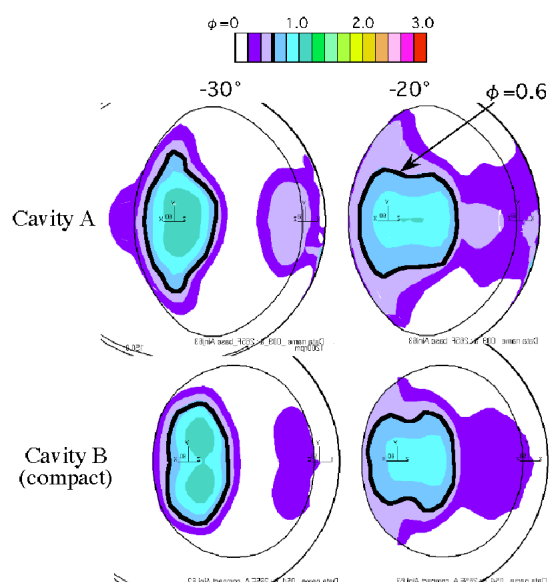


Fig. 10 Effect of cavity shape on the mixture distribution (IT=-63°ATDC).

5. まとめ

EGR下における直噴ガソリンエンジン成層運転時の燃焼変動を、LIF法によるサイクルごとの混合気濃度計測と、筒内圧力の同時計測により解析し、以下の結果を得た。

(1) 噴射の進角側、および遅角側の燃焼変動は初期燃焼期間との、一方適正噴射時期近傍の燃焼変動は主燃焼期間との相関がそれぞれ高く、噴射時期により両者の主たる支配要因は異なっている。

(2) 噴射の進角および遅角側での燃焼変動は点火栓部の混合気濃度のサイクル間変動が主要因である。

(3) 適正噴射時期近傍での燃焼変動は、燃焼後半にキャビティ周辺部に存在する希薄混合気量のサイクル間変動と強い相関があり、この部分の希薄混合気量低減が燃焼変動改善に有効である。

(4) CFD解析より、均質な噴霧濃度分布とコンパクトなキャビティ形状でキャビティ周辺部の希薄混合気量を低減できることを明らかにし、実機の燃焼変動低減につながった。

参考文献

- 1) Harada, J., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.970540(1997)
- 2) Iwamoto, Y., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.970541(1997)
- 3) 伊藤之一, 加藤千詞, ほか3名 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.21-00(2000), 13
- 4) 角方章彦, 伊東輝行, ほか1名 : 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, No.99-25(1999), 177
- 5) Fujikawa, T., et al. : JSME Int. J. Ser. B, **42**-4(1999), 760
- 6) 藤川武敏, 服部義昭, ほか2名 : 第37回燃焼シンポジウム講演論文集, (1999), 175
- 7) Fujikawa, T., et al. : Proc. COMODIA2001, (2001)
- 8) 小池誠, 斎藤昭則, ほか2名 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.69-99(1999), 1
- 9) 神田睦美, 清水里欧, ほか4名 : 自動車技術会学術講演会前刷集, No.69-99(1999), 5

(2001年10月26日原稿受付)

著者紹介



藤川武敏 Taketoshi Fujikawa

生年：1957年。

所属：直噴ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象のレーザ計測。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。



野村佳洋 Yoshihiro Nomura

生年：1960年。

所属：直噴ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象の数値解析(CFD)。

学会等：日本機械学会，自動車技術会，日本ガスタービン学会会員。
工学博士。



服部義昭 Yoshiaki Hattori

生年：1971年。

所属：動力ガソリン研究室。

分野：エンジン筒内現象のレーザ計測。