

Particulate Matter Emission Reduction with Increasing Fuel Injection Pressure in a Gasoline Direct Injection Spark Ignition Engine

Takeshi UEKI ^{*}, ^{**}, Moriyasu GOTO ^{**}, Kei TAKACHIHO ^{**}, Takashi KASHIWAZAKI ^{**},
Eriko MATSUMURA ^{*}, Jiro SENDA ^{*}

(Received July 31, 2017)

In order to reduce particulate matter (PM) emitted from gasoline direct injection spark ignition (DISI) engine, it is important to reduce the fuel film deposition on the wall and local rich air-fuel mixture formation. As a means to reduce these, the high pressure fuel injection is considered to be effective. In this study, we evaluated the influence of increasing fuel injection pressure to PM emission with using the glass cylinder engine at fast idle operation. The fuel film deposition on the piston was measured by using ultraviolet irradiation to cause excited fluorescence in fuel which contained fluorescent agent. And, fuel liquid and vapor phase was measured by using Laser Induced Exciplex Fluorescence (LIEF) method. The number of PM from DISI engine was decreased by increasing fuel pressure from 20MPa to 80MPa. The fuel film deposition on the piston was decreased by increasing the pressure. The area of the liquid phase inside the combustion chamber was reduced, and the variation of vapor phase was decreased by increasing the fuel pressure.

Key words : gasoline engine, direct injection, particulate matter

キーワード : ガソリンエンジン, 燃焼室内直接燃料噴射, 粒子状物質

直噴ガソリンエンジンにおける噴射燃料の高圧化による排出PMの低減

植木毅, 後藤守康, 高千穂慧, 柏崎貴司, 松村恵理子, 千田二郎

1. まえがき

昨今, 熱効率向上に向け, 混合気の形成自由度の高い直噴ガソリンエンジンを用いた燃焼研究が盛んに進められている. また, 地球環境の負荷低減の観点から, 直噴ガソリンエンジンに対し, 排気ガス中の粒子状物質 (Particulate Matter: PM) の規制導入が決まり, 直噴ガソリンエンジンには熱効率向上と排気エミッション改善を両立する技術開発が求められている. このような状況の中, 植木らはPM低減に向けた研究を進めており, これまでに直噴ガソリン

エンジン燃焼室内のPM生成を明らかにするためPM空間分布を可視化解析し, PM低減には壁面に付着する燃料液膜に加えて, 空間中に浮遊する燃料液滴や局所的な過濃混合気の抑制が重要であることを示してきた¹⁾. これらPM生成要因を低減する一策として燃料の高噴射圧化に着目し, 本報では, まず高噴射圧化による噴霧特性として, 噴霧の微粒化と噴霧への空気導入(エアエントレインメント)の増加について報告する. そして, 実機エンジンで燃料の高噴射圧化によるPM低減について報告する.

* Department of Energy and Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6405, E-mail: eup1505@mail4.doshisha.ac.jp, jsenda@mail.doshisha.ac.jp
** SOKEN, INC., Aichi

2. 実験装置と方法

2.1 評価項目

高噴射圧化によるエンジンからの排出 PM 低減とその要因を把握するため、ノズル単体での噴霧特性とエンジン評価を実施した。噴霧特性の評価は、噴霧粒径とエアエントレインメントを計測した。エンジン評価は、排気 PM 粒子数の計測に加え、PM 生成要因として考えるピストン頂面の燃料液膜と混合気分布を計測した。

2.2 評価ノズル

本報での評価ノズルは、Table 1 に示す仕様のノズルを用いた。燃料噴射圧 20, 50, 80MPa で最大噴射率が同等となるようにインジェクタ先端のノズルを評価噴射圧ごとに選定した。インジェクタは噴射

Table 1. Nozzle specifications.

	Nozzle A	Nozzle B	Nozzle C
Actuator	Piezoelectric element		
Slit number	1		
Worked angle	91 deg.		
Slit length L	0.3 mm		
Slit thickness t_s	0.21 mm	0.13 mm	0.10 mm
L/t_s	1.4	2.3	3.0

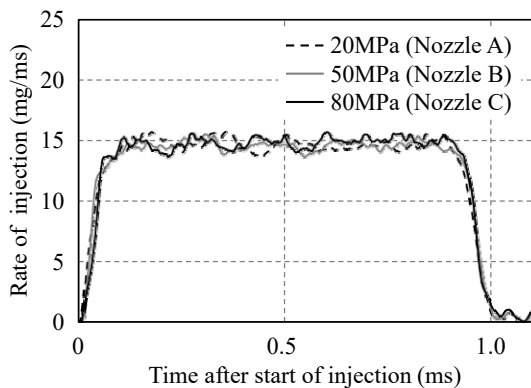
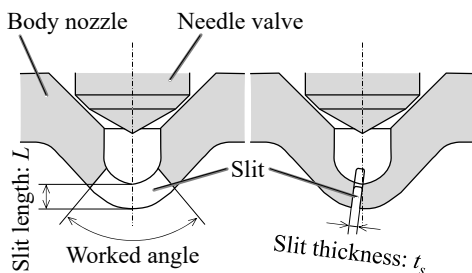


Fig. 1. Rate of injection profiles.

制御アクチュエータにピエゾスタックを用いた研究用の試作品であり、電圧を印加することによりピエゾ素子の変形する逆電圧効果を利用し、ニードルを開閉し、噴射を行う駆動方式である。ノズルには、噴霧形状がファンスリット状となるよう矩形噴孔を持つスリットノズルを用いた。Fig. 1 の噴射率が示すように、圧力 20, 50, 80MPa で最大噴射率が同等となるよう、スリット厚みを高噴射圧ほど薄くしている。

2.3 噴霧粒径計測

噴霧粒径の計測には影写真法を用いた^{2, 3)}。影写真法は、噴霧に光を背面より照射し、噴霧の影を撮影し、画像処理により粒径を計測する手法である。影写真法の構成を Fig. 2 に示す。光源には Nd-YAG パルスレーザ (波長 532nm) を用い、レンズで拡大させた後、波長変換素子を通させ、噴霧に照射した。撮影はその下流側で行い、対物レンズ (被写界深度 $7 \mu\text{m}$) を介して、CCD カメラ (画角 2456×2058 画素) で撮影した。ここで波長変換素子の役割は、レーザ光がもつ単一波長を広帯域の波長に変換し、撮影画像のスペックルノイズを抑制することである。レーザ光と波長変換素子の組み合わせにより、高強度かつ広波長域の短パルス光となり、直噴ガソリンエンジン用インジェクタのような高数密度の噴霧における噴霧粒子を撮影することができる。本研究における噴霧撮影範囲は、ノズル先端下方 50mm の噴霧中心で、撮影画角は $0.84\text{mm} \times 0.70\text{mm}$ (1 画素 = $0.34 \mu\text{m} \times 0.34 \mu\text{m}$) である。燃料には n-ヘプタンを用いた。

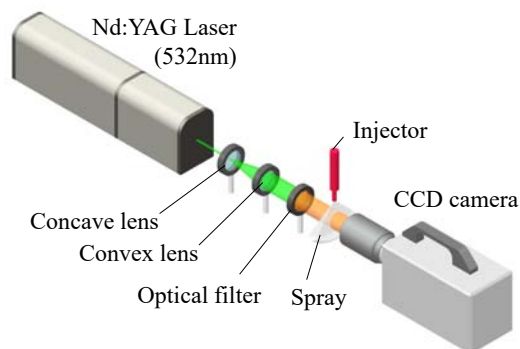


Fig. 2. Experimental apparatus for measuring droplet diameter.

2.4 噴霧に誘引される空気流速の計測

噴霧に誘引される空気の流速は、粒子追跡法 (Particle Tracking Velocimetry, 以下PTV法)により計測した^{4,5)}。PTV法とは、空間に浮遊させたトレーサ粒子の個々の速度と方向を画像解析により求める手法である。今回、一噴射中における噴霧に誘引される空気流速を時系列計測するため、高繰り返しレーザと高速度カメラを同期させ撮影した。PTV法の構成をFig. 3に示す。容器には一辺100mmの定容容器を用い、トレーサには平均粒径 $2.0\mu\text{m} - 2.5\mu\text{m}$ の SiO_2 中空粒子(真密度 $2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)を用い、攪拌機を用いて、容器内に均一に浮遊させた。周囲流れに対するトレーサの追従性の指標として、トレーサの終端速度 v_s と流れの代表速度 U の比であるストークス数 $S_t (S_t = v_s / U)$ は、 5.9×10^{-3} 程度となり、1より十分小さく、周囲流れに良く追従していると考えられる。光源にはNd-YAGレーザ(発振周波数50kHz、波長532nm、発光期間20ns)を用い、シリンドリカルレンズを介してレーザシート平行光として容器内に照射した。この際、噴霧にレーザシート光

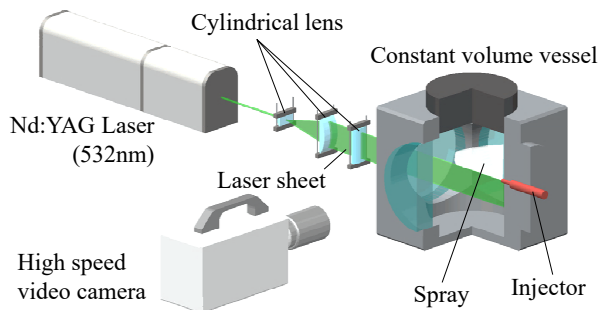


Fig. 3. Experimental apparatus for measuring air entrainment into spray.

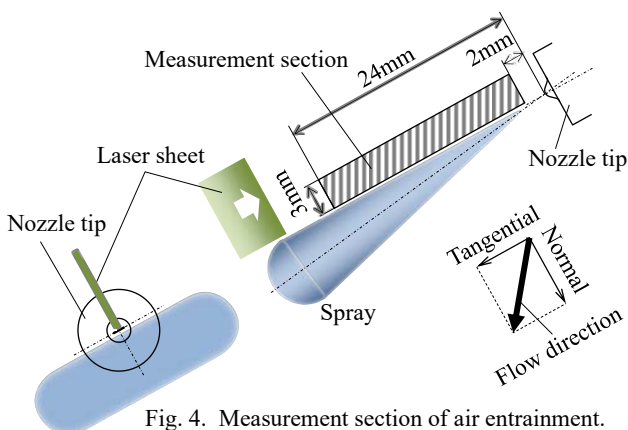


Fig. 4. Measurement section of air entrainment.

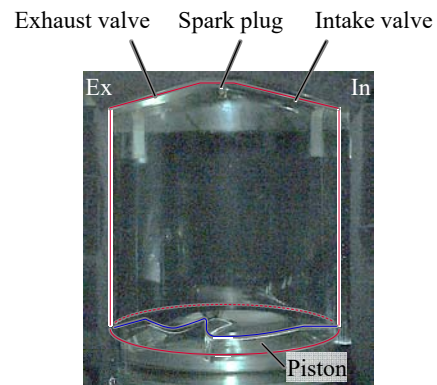
がかかると、強い散乱光により周囲のトレーサ粒子が認識できなくなるため、レーザシート光は噴霧外縁に沿うように照射した。今回の計測では、スリット噴霧の厚み方向に誘引される空気流速をPTVにより算出した。解析エリアはFig. 4に示すよう、噴霧外縁から3mmの範囲である。解析エリアで検出された流速のうち、噴霧外縁に対し垂直成分をエアエントレインメント速度と定義した。

2.5 評価エンジン

評価エンジンはTable 2に示す仕様のサイド噴射レイアウトの直噴ガソリンエンジンを用いた。PM粒子数およびエンジン性能の評価には通常エンジンを用い、燃焼室内の挙動およびピストン頂面の燃料液膜、混合気分布の評価時にはシリンダライナを石英ガラスに置き換えたガラスシリンダエンジンを用いた。ガラスシリンダの設置気筒は最もリア側の#4気筒である。下死点におけるリア側からの視野をFig. 5に示す。本エンジンはペントルーフを含む全域を観察可能であり、燃料噴射から燃焼に至る一連の現象を把握することができる。なお、本エンジンは冷却水を循環させず、また#4気筒へのガラスシリンダ(肉厚12mm)設置によるスペース確保のため、#3気筒は廃止している。

Table 2. Engine specifications.

Type	4-cylinder, In-line
Displacement	2.0L
Bore × Stroke	$\phi 86\text{mm} \times 86\text{mm}$
Compression ratio	10 : 1
Injection system	Direct Injection



180deg.BTDC (BDC)
Fig. 5. Observation area.

2.6 ピストン頂面における燃料液膜の計測

ピストン頂面の燃料液膜厚さは、蛍光剤入り燃料を用い紫外線照射による蛍光発光強度を計測する方法で計測した (Fig. 6). ガラスシリンダエンジンを用いて、紫外線 (照射波長 280nm - 400nm) をエンジン外よりガラスシリンダを通してピストン頂面に均一照射した. 燃料にはプレミアムガソリン (RON100) に蛍光剤 (Marktec 製, OL-200 II) を 1%vol. 混入させた. 点火プラグ穴に凹レンズを設置し、撮影はモータリング運転の 1 サイクルで実施し、ICCD カメラ (I. I. ゲート幅 100 μ s) を用いて、膨張行程下死点 (180deg. ATDC) で撮影した. ICCD カメラの前には燃料液膜の蛍光のみを撮影するため、バンドパスフィルタ (中心波長 550nm, 半値幅 210nm) を設置した. 燃料液膜の評価指標として液膜厚さと面積を採用した. なお、燃料液膜の厚さは、事前に実施した同一光学系での液膜厚さと蛍光発光強度の検定評価より定量化している.

2.7 エンジン燃焼室内における混合気分布の計測

混合気分布は、レーザ誘起エキサイプレックス蛍光法 (Laser Induced Exciplex Fluorescence : LIEF 法) により計測した^{6,7)}. LIEF 法とは、蛍光剤を混入した燃料にレーザを照射することにより、分子を励起させ蛍光を誘起させる手法である. 蛍光剤を二種類用いることで励起錯体を形成させ、その蛍光剤の持つ蛍光と異なる波長域で蛍光させることができる. そのため、①各分子間距離が遠い (密度が低い) 状態

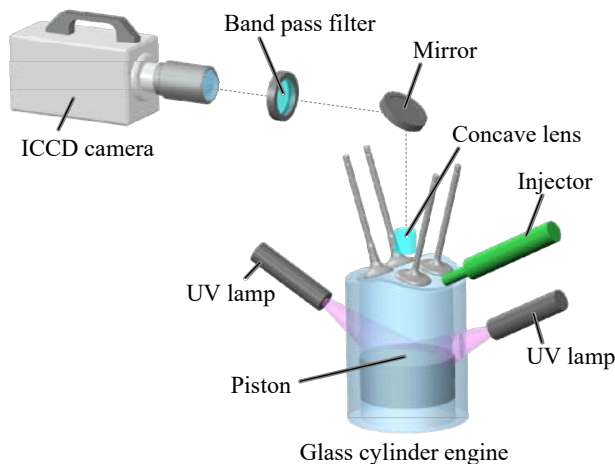


Fig. 6. Experimental Apparatus for measuring piston fuel film deposition.

では、励起錯体を形成しにくいいため蛍光剤特有の蛍光となり、②分子間距離が近い (密度が高い) 状態では励起錯体による蛍光が加わることを利用し、撮影波長域を①と②に応じて分けることで、①を気相、②を液相と定義し、燃料状態やその濃さを推測することが可能である.

LIEF 法による混合気分布計測の構成を Fig. 7 に示す. ガラスシリンダエンジンを用いて、レーザシート光を点火プラグ穴より燃焼室内に照射し、それと直交するようリア側から ICCD カメラ (I. I. ゲート幅 200 μ s) を用いて、燃焼室内の混合気分布を計測した. レーザには Nd-YAG レーザ (第四高調波 266nm, エネルギー 80mJ) を用い、点火プラグホール内に光学レンズを設置し、レーザシート光としてボアセンタに照射した. 気相と液相を同時撮影するため ICCD カメラの前には 2 系統同時撮影光学系を設置し、1 台のカメラで同一視野の 2 画像を横並びで撮影する.

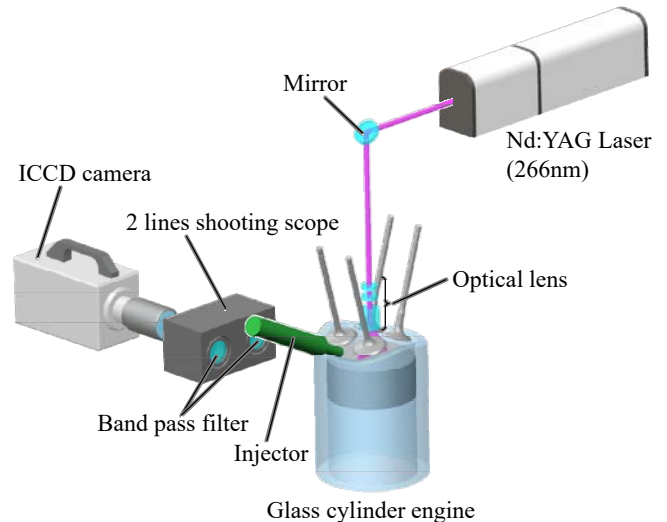


Fig. 7. Experimental setup of the LIEF technique.

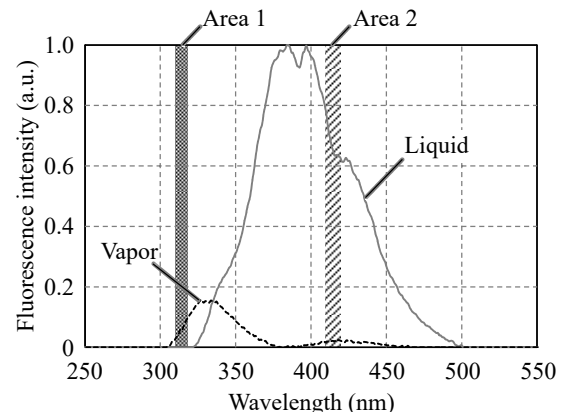


Fig. 8. Fluorescence spectrum.

各光路中にはバンドパスフィルタを設置しており、各バンドパスフィルタは使用する燃料の気/液相の発光スペクトルを基に選定している。LIEF 法に用いた燃料は、基材には波長 266nm の光で蛍光を発しないイソオクタンを用い、蛍光剤には N,N-ジメチルアニリン 3%wt. とナフタレン 5%wt. を用いた。使用燃料の気/液相における発光スペクトルを Fig. 8 に示しており、液相の最大輝度を 1 とし相対表記した。今回は、Area1 と Area2 の波長域を選定し、Area1 における撮影画像を気相、Area2 を液相と定義し、バンドパスフィルタ(気相：中心波長 314nm・半値幅 8nm, 液相：中心波長 419nm・半値幅 10nm)を選定した。酸素による蛍光剤の消光作用を抑制するため、エンジンへの吸気ガスには窒素を用いた。また、ピストンキャビティ内の混合気分布を計測するため、ボアセンタへの溝(幅 2mm)とリア側一部を追加加工した。

3. 結果および考察

3.1 噴霧特性

最初にノズル単体の噴霧特性として、噴射圧による噴霧粒径と噴霧へのエアエントレインメント速度を計測した。噴射条件を Table 3 に示す。噴射期間は、各ノズルとも軽～中負荷域に相当する実噴射期間 $t_{inj} = 0.98\text{ms}$ に設定した。燃料には n-ヘプタンを用いた。噴射開始 $t = 0.7\text{ms}$ 後の噴霧画像を Fig. 9 に、噴霧長の時間変化を Fig. 10 に示す。噴霧画像は 5 ショットの平均画像である。噴射開始直後の噴霧長変化は高噴射圧ほど大きく、時間が経つにつれ噴霧長の差は小さくなる傾向がみられた。今回用いた 3 諸元のノズルは、噴射圧力が違うものの最大噴射率を揃えており、高噴射圧用ノズルほどスリット厚さを薄くし開口面積を小さくしている。このため高噴射圧用ノズルほどノズル出口の噴射速度が速く、噴霧が伸びたものと考えられる^{8,9)}。また、時間とともに噴射圧力による噴霧長の差が小さくなったのは、噴霧液滴の大きさが影響していると推定しており、スリット厚みが薄い高噴射圧用ノズルほど、ノズル出口での液膜分裂が促進→微粒化→液滴の速度が減衰しやすくと考える。そこで、次に噴霧粒径を計測した。

Table 3. Experimental conditions.

Nozzle	A	B	C
Injection pressure P_{inj}	20 MPa	50 MPa	80 MPa
Test fuel	iso-octane		
Maximum rate of injection q_{max}	14.7 mg/ms		
Injection duration t_{inj}	0.98 ms		
Ambient gas	N_2		

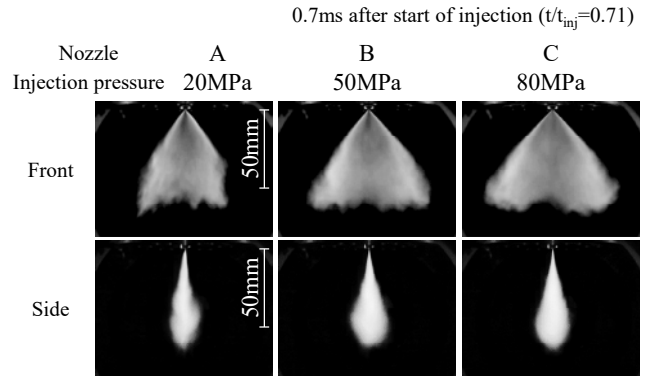


Fig. 9. Spray images.

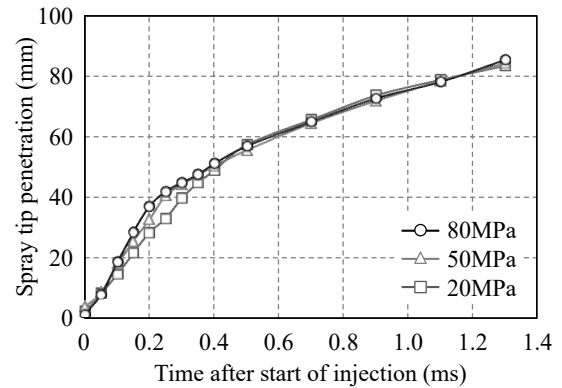


Fig. 10. Spray tip penetration.

3.2 噴霧粒径

噴霧粒径として、各ノズルの所定噴射圧におけるザウター平均粒径(Sauter Mean Diameter, 以下 SMD) と Dv_{90} を Fig. 11 に示す。雰囲気圧は大気圧、雰囲気温度は 25°C で評価した。SMD は液滴の体積の総和と表面積の総和の比であり、体面積平均粒径とも呼ばれる。また、 Dv_{90} は計測した液滴の総体積に対し、90%に達するときの粒径を表したものであり、体積平均粒径とも呼ばれ、粗大液滴の存在を表す指標として用いた。個々の液滴粒径は球体と仮定し算出し、SMD や Dv_{90} を求めた。計測時期は、噴射開始後 0.7ms 後 ($t/t_{inj} = 0.71$) で Fig. 1 に示す噴射率より、噴射が安定している時期である。計測位置は、ノズル先端から噴射方向に下方 50mm の位置で計測し、計測時

の噴霧全長 L に対し、およそ $0.8 \times L$ の位置である。カウントした粒子数はいずれの条件とも 4000 個程度である。

Fig. 11 より、高噴射圧化により、SMD・Dv90 とともに小さくなっており、粗大液滴が低減し、微粒化している。さらに詳しく把握するため、粒径分布として噴霧液滴の体積頻度分布を Fig. 12 に示す。高噴射圧化により、 $10 \mu\text{m}$ 以下の粒径が増加し、 $15 - 30 \mu\text{m}$ の粗大液滴が低減しており、特に 20MPa から 50MPa にかけて顕著である。

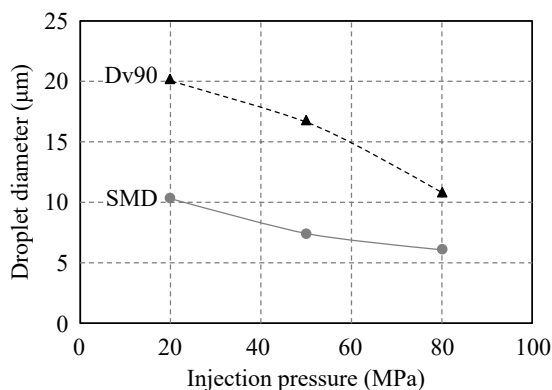


Fig. 11. Droplet diameter SMD and Dv90.

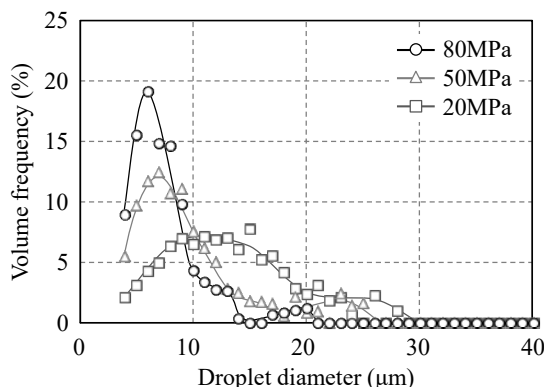


Fig. 12. Droplet size distribution.

3.3 噴霧へのエアエントレインメント速度

PTV 法による計測例として、Fig. 13 に t/t_{inj} 1.1 における結果を示す。雰囲気環境は、密度 ρ_a 3.2kg/m^3 (圧力 P_a 0.4MPa, 温度 T_a 423K) で、窒素雰囲気である。矢印の向きが流れの方向を表している。どの噴射圧においても、ノズル近傍では、概ね噴霧に向かって誘引される傾向がみられる。時間および位置に対するエアエントレインメント速度の影響を把握するため、この解析画像をもとに処理を行った。

解析範囲は、Fig. 4 で示したように、解析範囲は噴霧外縁 - 3mm の区間で、解析対象は噴霧外縁に対し法線成分(エアエントレインメント速度と定義)の流速である。計測サンプル数を確保するため、複数ショットの撮影画像から各条件 6,000 個程度の粒子の流速を統計処理した。

噴射圧に対するエアエントレインメント速度の時間履歴を、Fig. 14 に示す。計測位置はノズル先端 2mm - 10mm であり、各時刻での平均流速を表記している。噴射圧に関わらず、噴射開始とともにエアエントレインメント速度は増加し、およそ t/t_{inj} 0.2 以降、エアエントレインメント速度の変化は小さく、一定値に収束する傾向がみられた。

次に、ノズル先端からの位置に対するエアエントレインメント速度として、速度が収束した噴射開始後 t/t_{inj} 0.3 - 0.7 におけるエアエントレインメント速度を Fig. 15 に示す。ノズル先端 2mm - 24mm の区間において 2mm 毎に区分けして各平均速度を算出している。どの噴射圧においてもノズル先端からの距離が 6mm - 12mm 付近でエアエントレインメント速度が極大となる傾向があり、高噴射圧ほど極大値が大きい。また極大となった後の速度低下は高圧噴射ほど大きい傾向がみられた。

このように位置によってエアエントレインメント速度に噴射圧力の差異がみられた要因として、ノズル先端からの噴射速度が影響していると考えられる。まず、高圧噴射ほどエアエントレインメント速度の極大値が大きくなったのは、高圧噴射ほど噴射速度が速く、周囲空気の誘引が多いためである。本研究では等噴射率で噴射圧力の影響を評価するためスリット厚みを変更している。高噴射圧ほどスリット厚みが薄いことから、ノズル出口部での流速が高い。掛川らによると噴射速度が速いほどエアエントレインメントが増加することから¹⁰⁾、高噴射圧ほどノズル出口部での流速が高く、エアエントレインメント速度が速まったと考える。次に、エアエントレインメント速度が極大をとった後の減衰が高噴射圧ほど大きいのは、高噴射圧ほど、噴射速度が速く、噴霧の分裂長さが短くなり、エアエントレインメントが低下したものと考える。清水らによると、噴霧の分裂

位置は噴射速度が速いほど短くなる傾向にある¹¹⁾。本研究では、上述したように高噴射圧ほど噴射速度が速いと考えられることから、噴霧の分裂位置が短くなり、エアエントレインメント速度が低下したものと考える。

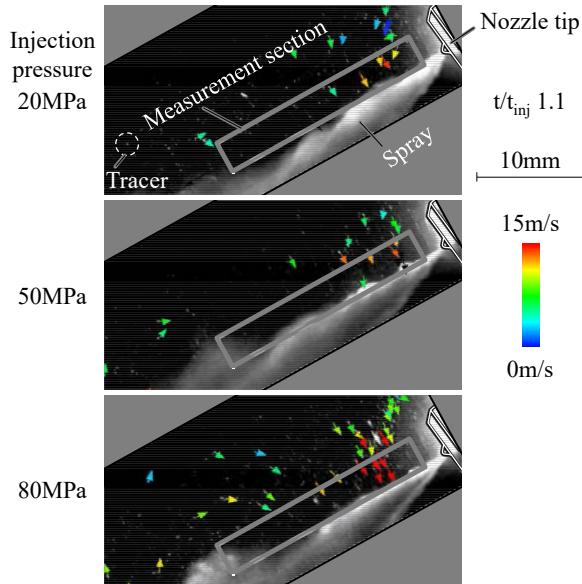


Fig. 13. A measurement example of air entrainment velocity.

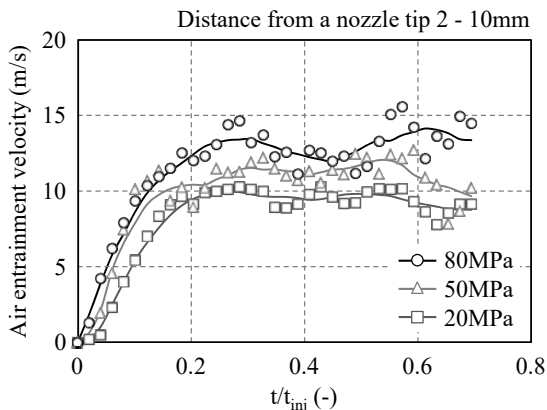


Fig. 14. Temporal change in air entrainment velocity.

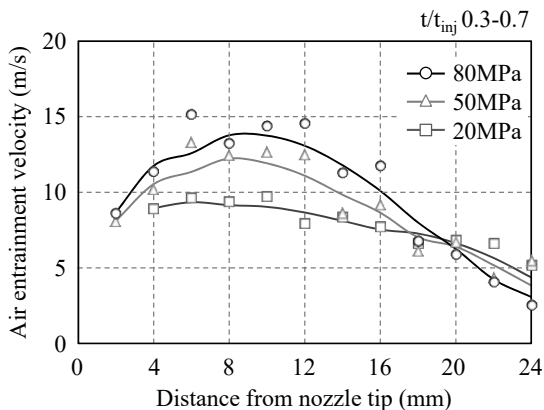


Fig. 15. Variation of air entrainment velocity.

3.4 エンジン評価条件

エンジン評価条件は Table 4 に示すファストアイドル条件とした。ファストアイドルは、冷間始動時に用いられる運転条件であり、排出PMが多い条件である¹⁾。ここで、ファストアイドルのエンジン制御は、部分負荷時の通常燃焼と大きく異なっている。Fig. 16 に示すように、通常燃焼では、主に吸気行程に燃料噴射し、圧縮上死点前に点火するのに対し、ファストアイドルでは、触媒の早期活性を狙い、圧縮行程に燃料噴射することで成層混合気を形成させ、圧縮上死点後に点火することで後燃えさせ、触媒を短時間で活性温度まで上昇させるエンジン制御を実施している。このような圧縮行程後半の燃料噴射を伴う運転のため、PM 発生要因として、ピストン頂面への燃料衝突により形成する燃料液膜、そして噴射から点火までのインターバルが短いことによる液滴燃料の残存や混合気の不均質が考えられる。今回の

Table 4. Experimental conditions.

Fast idle operation	
Engine speed	1200 r/min
IMEP (average)	210 kPa
Injection pressure	20, 50, 80 MPa
Injection timing	220deg.BTDC
Spark timing	40 deg.BTDC
A/F (target)	15.0
Oil temperature	40 °C

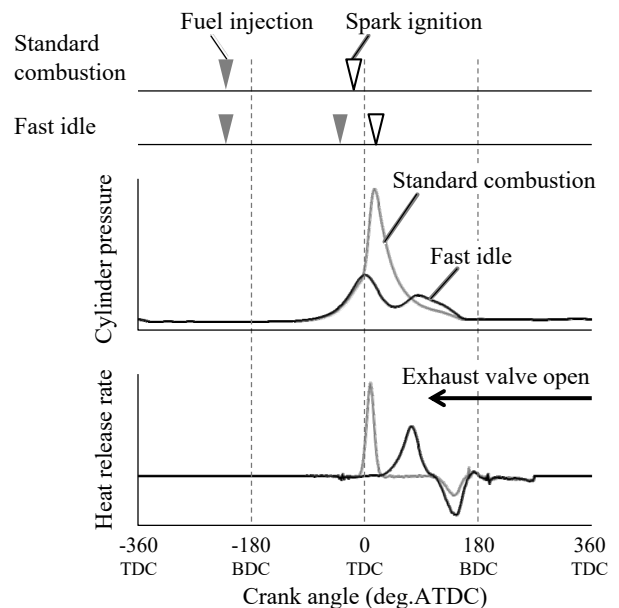


Fig. 16. Fast idle operation.

評価は、Table 4 に示すよう図示平均有効圧 (Indicated Mean Effective Pressure: IMEP) が 210kPa, 排気 A/F が 15.0 となるよう, 燃料噴射量と吸入空気量を調整した. 燃料噴射は, 吸気/圧縮行程の 2 回噴射で, 等量に分配している. なお, 燃焼安定性の指標として, 燃焼変動率 (IMEP COV) は, いずれの噴射圧においても 10% 以下で安定している.

3.5 排出 PM 粒子数

ファストアイドル条件での噴射圧変更による排出 PM 粒子数変化を Fig. 17 に示す. PM 粒子数の計測には, PM 粒径分布計測器 (粒子数カウントの粒径範囲 23nm - 523nm) を用いた. PM 粒子数は, 高噴射圧ほど PM 粒子数が少ない傾向がみられる. 特に噴射圧 20MPa から 50MPa にかけての PM 粒子数の低減が大きい. 噴射圧 20MPa から 80MPa の高噴射圧化により PM は 94.5% 低減する. 噴射圧によりこれらの違いがみられた要因を確認するため, まず燃焼室内の噴霧・燃焼挙動を観察した.

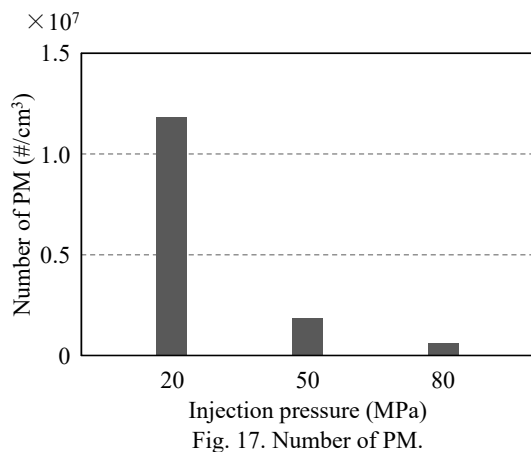


Fig. 17. Number of PM.

3.6 燃焼室内の噴霧・燃焼挙動

2.5 に示したガラスシリンダエンジンを用いて, 燃焼室内の噴霧・燃焼画像を Fig. 18 に示す. 撮影は, 高速度カメラ (撮影速度 12000 フレーム/s) を用いて撮影し, 燃焼光に加え噴霧も同時撮影するため, メタルハライド光源を照射し噴霧の散乱光を撮影した. 噴霧は視認性を向上させるため, 画像処理により着色処理を施した.

噴霧 (33deg. BTDC, 噴射開始後 7deg. CA 後) をみる

と, 高圧噴射時は, 噴霧の散乱光が小さい傾向がみられる. 噴霧の散乱光は燃料液滴が起因となる光であることから, 高圧噴射時は燃料気化が促進していると考えられる.

次に燃焼挙動 (90deg. ATDC) をみると, いずれの噴射圧ともピストン頂面および空間から輝炎 (火炎中に Soot が生成し, その固体放射による輝きのある炎. PM 生成の指標) が確認でき, 特に噴射圧 20MPa ではキャビティ頂面とリップ付近に輝炎が多く確認できる. そして, 高噴射圧化に伴い, 輝炎は減少する傾向がみられる. これより高圧噴射により, PM 生成要因となるピストン頂面の燃料液膜と空間に浮遊する燃料液滴もしくは過濃混合気が低減していると考えられる. そこで次に, ピストン頂面の燃料液膜を計測した.

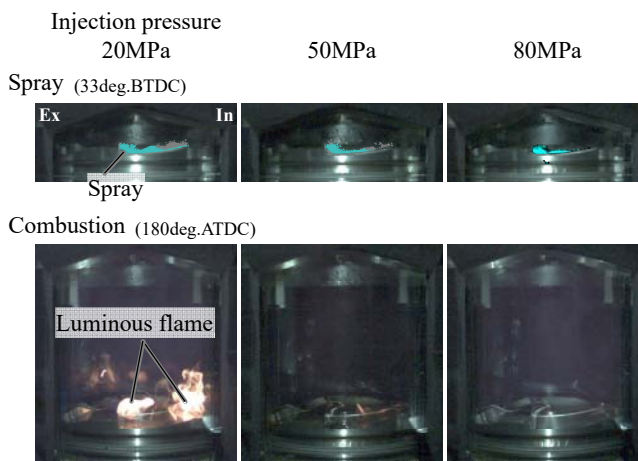


Fig. 18. Spray and combustion within a cylinder.

3.7 ピストン頂面の燃料液膜

ピストン頂面の燃料液膜を計測した代表画像を Fig. 19 に示す. 撮影時期は膨張行程下死点 (180deg. ATDC) で, 燃料液膜厚さをコンター表記している. 燃料液膜の計測は, 圧縮行程噴射のみで計測を行った. これは, 吸気行程 (220deg. BTDC) に対し, 圧縮行程 (40deg. BTDC) ではピストン頂面との距離が近く, そして点火までのインターバルが短いため, 形成した燃料液膜が気化しにくく, 残留すると考えたためである (なお, 吸気行程噴射での燃料液膜はほぼ無いことを確認している).

燃料液膜の形成位置についてみると (Fig. 19), 噴

射圧 20MPa ではキャビティとリップ付近にみられ、これは Fig. 18 で示した輝炎の発生位置と概ね一致している。そして、高噴射圧化により液膜が低減する傾向がみられる。なお、今回使用したピストンには、後述の 3.8. の混合気計測用のため追加工(吸気-排気方向の溝加工, リア側キャビティの切削)を施しているが、今回の評価条件では追加工に伴うリップ位置変更によりリップ付近の燃料液膜位置に差異はみられたが、その他の燃料液膜への影響は小さい。

次に、燃料液膜を定量的に把握するため、噴射圧力に対する燃料液膜の厚さ分布を Fig. 20 に、面積

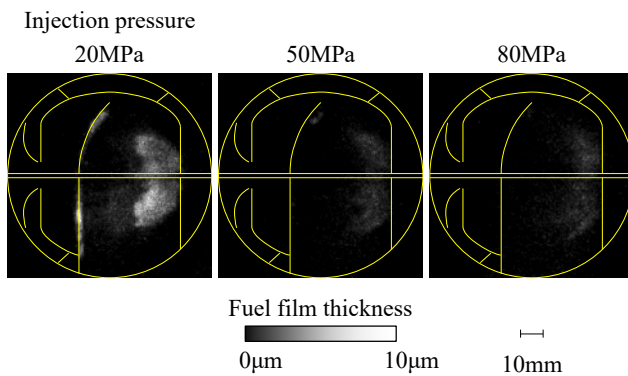


Fig. 19. Piston fuel film distribution.

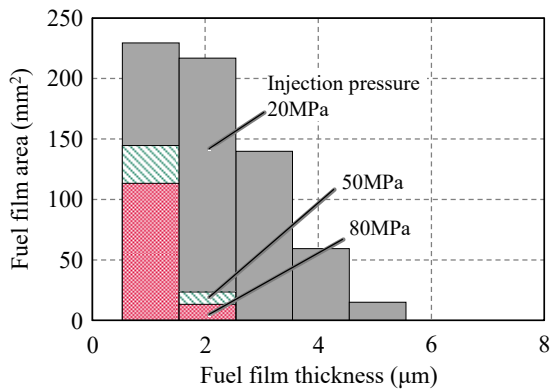


Fig. 20. Fuel film thickness distribution.

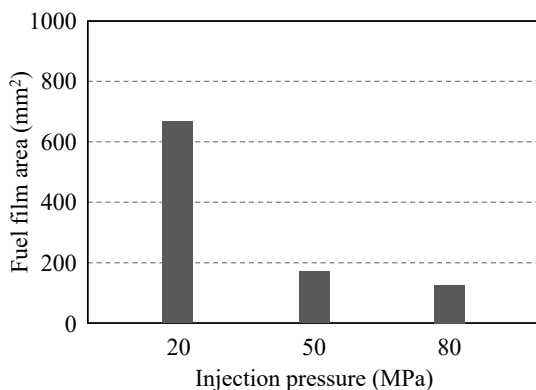


Fig. 21. Fuel film area.

を Fig. 21 に示す。燃料液膜の厚さの分布は、20MPa では最大 5μm 程度まで厚みがみられるが、高圧噴射ほど厚みは薄く、少なくなる傾向がみられる。50MPa 以上では、燃料液膜の厚さは 2μm 以下である。次に、燃料液膜の面積は、高噴射圧化(20MPa→80MPa)により 80.7%低減した。これより、高噴射圧化により燃料液膜は、薄く小さくなる。ここで、燃料液膜は運動量の大きい粗大液滴が随伴流に追従しきれずに壁面に衝突することで形成されるが、噴霧液滴は 3.2 より高噴射圧ほど粗大液滴が少なく、微粒化していることから、高噴射圧ほどピストン頂面に衝突する液滴が少なく、燃料液膜が少なくなったと考えられる。

3.8 燃焼室内の混合気分布

次に、高噴射圧化による PM 低減の要因として推定している過濃混合気および空間に浮遊する粗大液滴の低減を確認するため、燃焼室内の混合気分布を LIEF 法で計測した。計測した代表画像を Fig. 22 に示す。2 系統同時撮影光学系を用いて撮影した気相と液相の画像について、コンター表記した気相画像の上に、液相画像を重ね合わせている。計測断面は、吸気-排気方向のボアセンタである。撮影タイミングは、点火時期に相当する 18deg. ATDC である。評価は、点火プラグの代わりに光学レンズを設置しレーザを照射しているが、混合気と点火位置を把握するため、画像には点火プラグを仮想表記している。

気相に着目してみると、いずれの噴射圧とも、点火プラグの点火位置近傍に混合気が濃い傾向がみられ、また場所によるバラツキが確認できる。場所による混合気バラツキを確認するため、気相画像の輝度頻度分布を Fig. 23 に、輝度の変動率を Fig. 24 に示す。高圧噴射ほど低輝度側と高輝度側が低くなり、一峰性が若干強まる傾向がみられる。そして、高噴射圧ほど輝度の変動率が小さくなっており、これは、高噴射圧化による混合気の均質性向上を示していると考えられる。高噴射圧化することで、粗大液滴が減少し微粒化し、そして噴霧への空気取り込み(エアエントレインメント)が増加することから、ミキシングが促進していると考えられる。

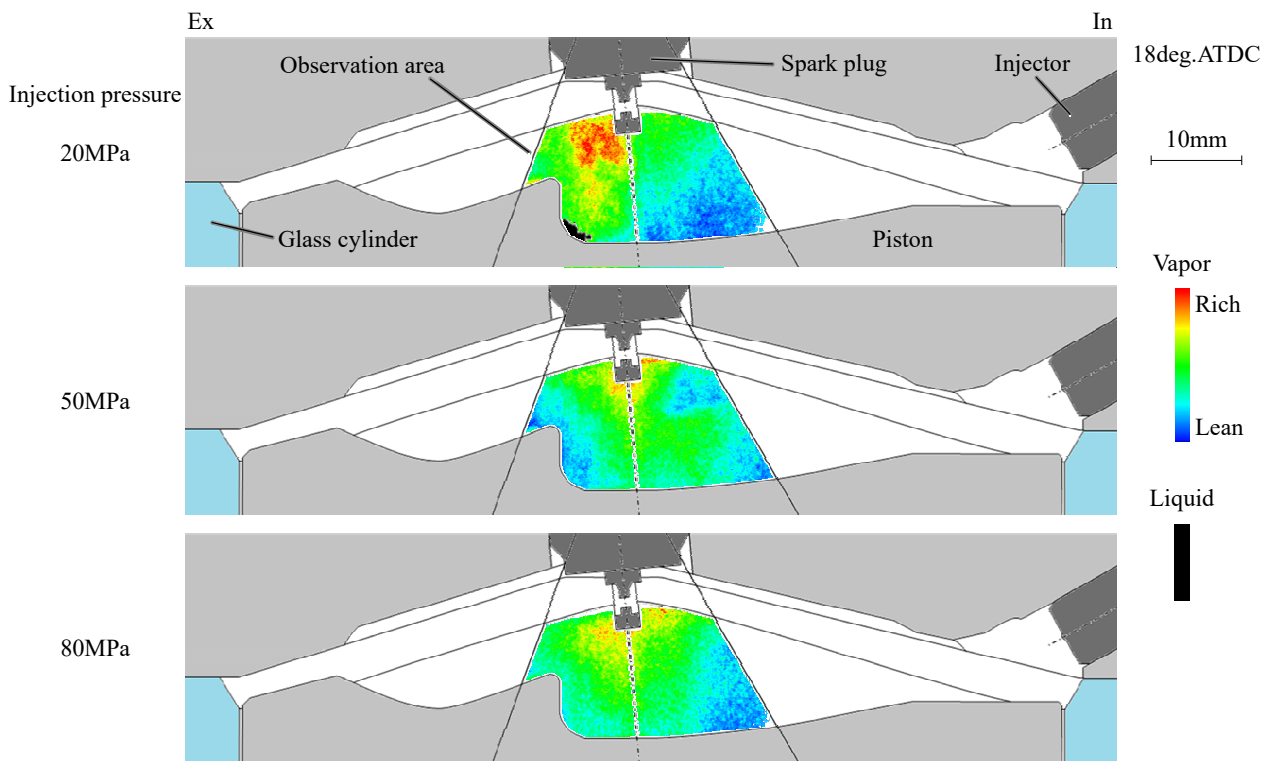


Fig. 22. Fuel vapor/liquid phase distribution.

次に、液相に着目してみると、噴射圧 20MPa において、ピストンキャビティのリップ下部周辺に液相が確認できる。それより高圧の噴射圧 50MPa と 80MPa ではほとんど確認できなかった。噴射圧 20MPa で確認できた液相は、圧縮行程での燃料噴射が起因するものと考えられ、ピストンへの噴霧衝突により飛散した液滴、もしくは、衝突により巻き上がった粗大液滴が滞留したものとする¹²⁾。

4. まとめ

直噴ガソリンエンジン用スリットノズルの高噴射圧化における PM 低減効果を把握するため、高噴射圧化による噴霧特性評価と、冷間始動時の触媒急速暖機運転(ファストアイドル)条件でのエンジン評価を実施し、以下の知見を得た。

- ・ 噴霧粒径は、高噴射圧化(20MPa→80MPa)により $Dv90 : 20.2 \mu m \rightarrow 10.8 \mu m$, $SMD : 10.4 \mu m \rightarrow 6.1 \mu m$ となり、粗大液滴が低減し、微粒化する。
- ・ 噴霧へのエアエントレインメント速度は、極大をとる傾向がみられ、高噴射圧ほど極大値が大きい。

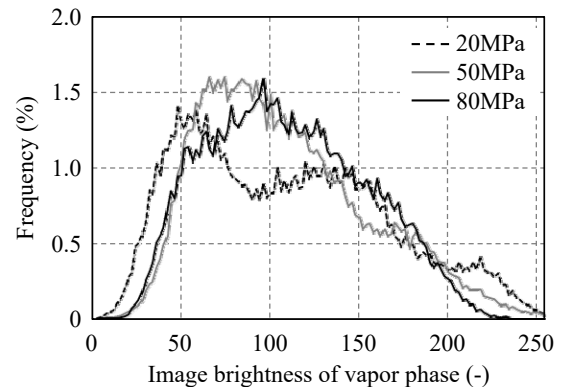


Fig. 23. Frequency distribution of vapor phase.

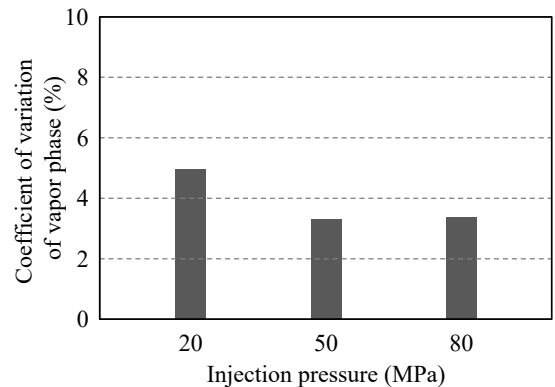


Fig. 24. Coefficient of variation of vapor phase.

- ・ 排気 PM は、燃焼が安定する噴射条件 (220deg. BTDC + 40deg. BTDC) において、燃料の高噴射圧化 (20MPa → 80MPa) により低減する。
- ・ 燃料の高噴射圧化 (20MPa → 80MPa) により、ピストン頂面の燃料液膜の厚さは薄くなり、面積は低減する。
- ・ 燃焼室内の混合気は、燃料の高噴射圧化 (20MPa → 80MPa) により液相が減少し、気相の空間バラツキが低減する。

以上より、燃料の高噴射圧化は、PM 生成要因である燃料液膜と過濃混合気を低減でき、直噴ガソリンエンジンの排気 PM 低減に有効な手段であることを確認した。

参考文献

- 1) 植木毅, 村瀬栄二, “可視化によるガソリン直噴エンジンのすす生成に関する研究”, 自動車技術会論文集, **45**[1], 63-68 (2014).
- 2) F. Aoki, S. Enomono, Y. Nakase, and H. Oumura, “Spray Analysis of Port Fuel Injector”, *SAE Paper*, 2005-01-1154 (2005).
- 3) 調尚孝, 姉崎幸信, 槍野素成, 松村恵理子, “高数密度燃料噴霧の影画像処理による粒径計測に関する研究”, 微粒化シンポジウム講演論文集, **17**, 333-336 (2008).
- 4) H. Fujimoto, G. T. Sato, and T. Matsuzawa, “Investigation on Combustion in Medium-Speed Marine Diesel Engines Using Constant Volume Combustion Chamber”, *Naval Architecture and Ocean Engineering*, **17**, 190-210 (1979).
- 5) N. Toda, H. Yamashita, and M. Mashida, “PTV Analysis of the Entrained Air into the Diesel Spray at High-Pressure Injection”, *Proceedings of International Conference on Optical Particle Characterization*, **9232**, 92320C1-92320C6 (2014).
- 6) L. A. Melton, “Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor”, *Applied Optics*, **22**[14], 2224-2226 (1983).
- 7) 清水里欧, 松本清市, 古野志健男, 井口哲, 藤川武敏, 小島普璽, “LIEF 法を用いたリーンバーンエンジン内の混合気分布測定”, 第 10 回 内燃機関合同シンポジウム講演論文集, 301-306 (1992).
- 8) 廣安博之, 新井雅隆, “ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角”, 自動車技術会論文集, **21**, 5-11 (1980).
- 9) 河村清美, 勝見則和, 植田玲子, “直噴ガソリンエンジン用スリットノズルの噴霧特性”, *R&D Review of Toyota CRDL*, **36**[4], 13-18 (2001).
- 10) 掛川俊明, 塩路昌宏, 辻村欽司, “複数の混合領域を考慮したディーゼル燃焼の確率過程論モデル”, 自動車技術会論文集, **23**[2], 3-8 (1992).
- 11) 清水正則, 新井雅隆, 廣安博之, “高速噴流の分裂長さの測定”, 日本機械学会論文集 B 編, **49**[448], 2886-2892 (1983).
- 12) 深見洋司, 田邊弥彦, 千田二郎, 藤本元, “エキサイプレックス蛍光法による非定常壁面衝突噴霧の可視化”, 日本機械学会論文集 B 編, **58**[549], 1643-1649 (1992).