

## すす粒子計測が可能な単気筒 DI エンジンシステムの構築

日大生産工(院) ○宮田 茂喜

千葉大 窪山 達也

日大生産工 秋濱 一弘 山崎 博司 今村 宰

## 1. まえがき

自動車の低燃費化が進められ、燃費が良くディーゼルエンジンよりも低コストな直接噴射式ガソリンエンジンが普及している。しかしながら、直噴ガソリンエンジンでは粒子状物質(PM: Particulate Matter)の排出が課題となっている。欧州ではすでに Particulate Number (PN)の規制が厳格化し、日本でも2024 年末までに PN 規制開始が検討されている<sup>(1)</sup>ことから、PM/PN 抑制技術の開発が求められる<sup>(2)</sup>。しかし、微粒子生成過程を実験的手法のみで解析することは難しく、数値シミュレーションの活用が不可欠である。そこで、現在では直噴ガソリンエンジンの排出微粒子の予測モデルの開発が進められており、実機での検証データが必要となる。

本研究では低温環境下など、様々な環境下を模擬した PM/PN の計測に加えて筒内の可視化を可能とする新エンジン計測システムの構築を行った。その上で新機能である可視化の実験を行い、筒内可視化が可能なことを実証した。

## 2. 供試エンジン及び装置概要

## 2.1 エンジン計測システム

本研究で用いたエンジンの主要諸元を表 1 に示す。ボア径は 79.7mm、ストローク 81.1mm、排気量 404cm<sup>3</sup>の単気筒直噴ガソリンエンジンを使用した。圧縮比は 13.86 で、ピストンは高圧縮比ピストンを使用している。しかしながら高圧縮比ピストンではピストン冠面の凹凸が大きく数値シミュレーションには不向きのため、PM/PN 計測にはフラットピストン（圧縮比 11.5）を使用する予定である。

表 1 供試エンジン仕様

|                       |                                          |
|-----------------------|------------------------------------------|
| Engine type           | Single cylinder                          |
| Fuel injection system | Side-mounted direct injection            |
| Displacement          | 404.6 cm <sup>3</sup>                    |
| Bore × stroke         | 79.7 mm × 81.1 mm                        |
| Compression ratio     | 13.86<br>(11.5)                          |
| Type of piston        | High compression piston<br>(Flat piston) |

従来から実施している排出微粒子計測は新エンジンの設置に合わせて排気管への取り付けを変更した。質量濃度計測と個数濃度計測が実施可能である。測定には光学式スモークメータ(LEX-635s, Sokken)を用い、微粒子の粒径分布の測定にはリアルタイム自排微粒子解析装置 EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer, model 3090, TSI)と排ガス用希釈装置(MD19-2E)を利用した。粒子数濃度の計測において、希釈装置と流量調整ユニットにより排出ガスを 140 倍に希釈する。冷間始動から暖機過程における燃焼室の壁および表面温度条件を模擬するため、チラー (PCU-W6600R, APISTE) を用いて、冷却水温度を制御した。また、シリンダーブロックを加工しシリンダーライナーに熱電対を設置、燃焼室壁温の計測を可能にした。さらに様々な運転環境を模擬するためインタークーラーと燃料ポンプに付属した熱交換器に冷却水を通し、吸入空気温度と燃料温度を制御する。供試機関、チラー、圧力センサ、熱接点及び排出ガス計測機など各種装置の概略図を図 1、実際のエンジンベンチの画像を図 2 に示す。

## Construction of the Single-Cylinder DI Engine System Capable of Measuring Soot Particles

Shigeki MIYATA, Tatsuya KUBOYAMA, Kazuhiro AKIHAMA  
Hiroshi YAMASAKI and Osamu IMAMURA

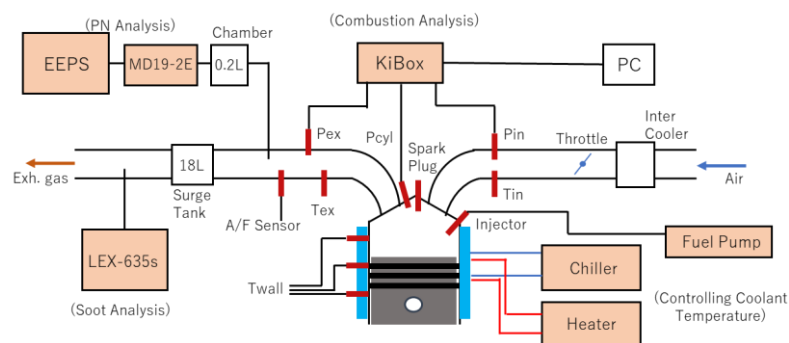


図 1 実験装置概略図

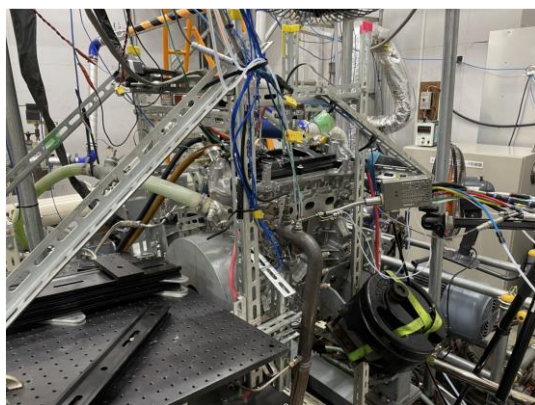


図 2 エンジンベンチ画像

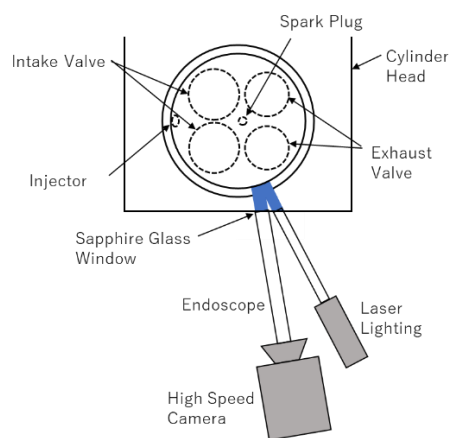


図 3 可視化装置概略図

## 2.2 可視化計測

可視化はシリンダヘッドを加工し、サファイアガラス窓を取り付けハイスピードカメラにて撮影を行った。撮影にはハイスピードカメラ(TMX7510, Vision Research)とエンドスコープ(88370AX, KARLSTORZ)、光源には可視化用レーザー照明(Cavilux HF, CAVITAR)を使用した。可視化装置の概略図をシリンダヘッドの断面図と共に図 3 に示す。

可視化実験の条件を表 2 に示す。エンジン回転数は1000rpm、吸気温度は30℃で一定とした。エンジン負荷(グロス図示平均有効圧力, IMEP gross)と燃焼位相(CA50)をそれぞれ0.5MPa, 9deg.ATDCで一定とした。燃料はハイオクタン価ガソリンを使用し、空燃比は14.6とした。エンジンは冷却水温度80℃で暖機し、燃料噴射開始時期(SOI)を変化(-320, 280, -200deg.ATDC)させ燃料噴霧の様子や筒内燃焼の撮影を行った。撮影条件はフレームレートを10000fps、露光時間は99μsに設定し、撮影開始のトリガーを燃料噴射信号で行った。

表 2 可視化実験条件

|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| Engine speed                  | 1000 rpm                   |
| Intake air temperature        | 30 °C                      |
| Gross IMEP                    | 0.5 MPa                    |
| CA50                          | 9 deg. ATDC                |
| A/F                           | 14.6                       |
| Start of fuel injection (SOI) | -320, -280, -200 deg. ATDC |
| Coolant temperature           | 80℃                        |

## 3. 実験結果

可視化実験は燃料噴射開始時期ごとに2回ずつ撮影した。図4に点火、燃焼、排気行程、吸気行程の筒内画像を示す。燃料噴射開始時期は-200 deg.ATDC である。なお図では窓枠による視野と各行程で動作しているピストンとバルブを白色線で示している。

燃料噴射信号で撮影を開始した場合、点火から排気行程、吸気行程は撮影することに成功した。図 5 に燃料噴射開始時期を変化させた時の

撮影時期 10deg.ATDC における燃焼状態の変化を示す. -200 deg.ATDC (吸気行程終盤噴射) ではおおむね均一に燃焼しているが, -280 deg.ATDC (吸気行程中盤噴射) と -320 deg.ATDC (吸気行程初期噴射) ではすす粒子多量発生 of 要因であるプール燃焼による局所的な輝炎が発生している. これは, ピストンが上死点付近で燃料噴射しているため, ピストン冠面に液膜が形成されたことが原因である.

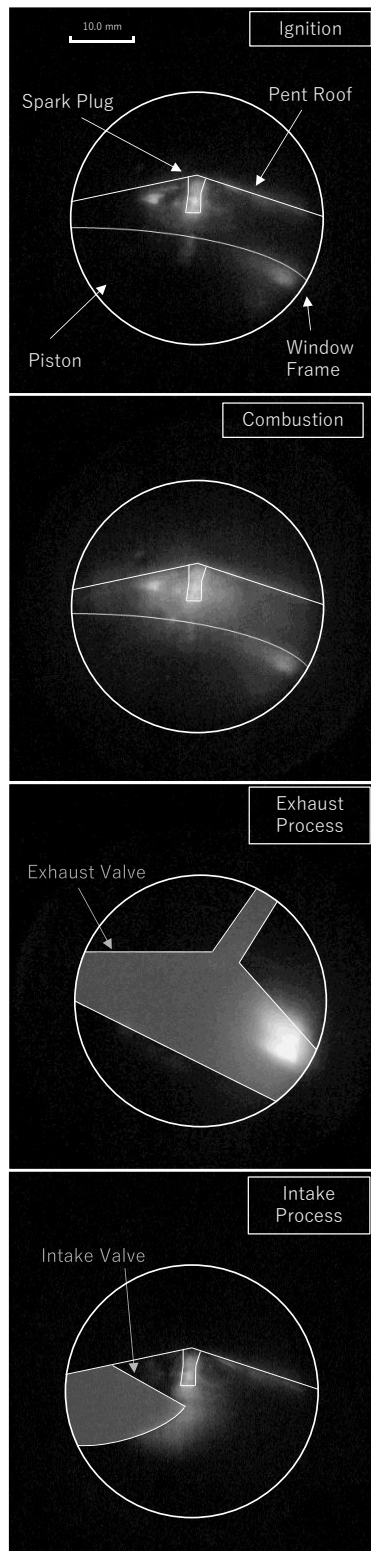


図4 点火, 燃焼, 排気行程, 吸気行程における筒内撮影画像例

前記の撮影では燃料噴霧を撮影することができなかった. これは燃料噴射信号で撮影を開始した場合, 2ms ほどのカメラ内部のディレイにより燃料噴霧 (噴射期間: 約 1ms) が撮影できなかったと考えられる. よって, 引き続き実施した可視化計測では撮影開始のトリガーを燃料噴射信号から 100 フレーム分 (10ms) 前にして再度試みた結果, 燃料噴霧を撮影することに成功した. 画像を図 6 に示す. 引き続きの実験のため, ガラス窓の汚れにより吸気バルブの一部が不鮮明になっているものの, 噴霧の計測に成功し, 噴射時期の違いによる噴霧の広がりの違いが確認できる.

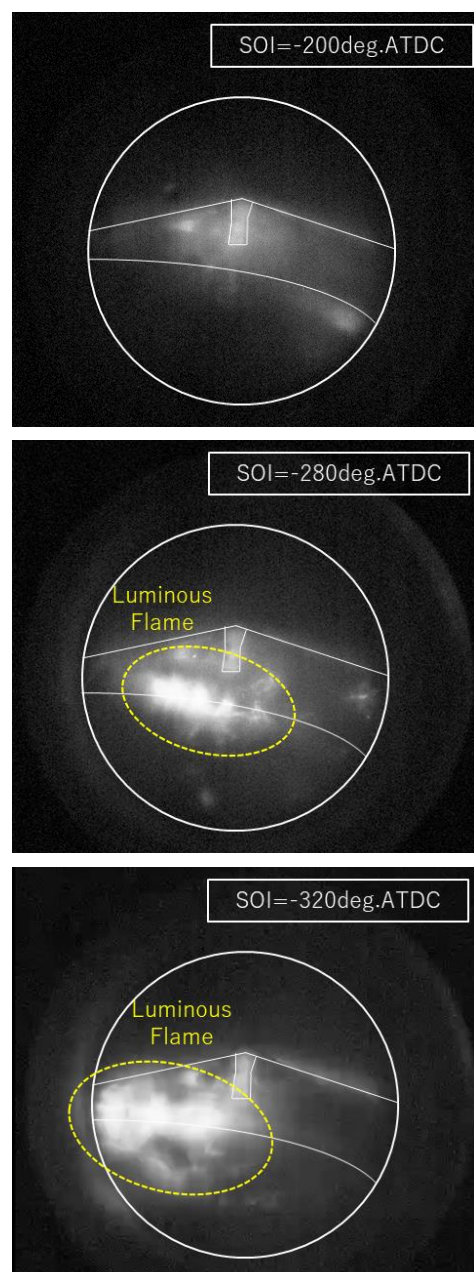


図5 燃料噴射開始時期ごとの燃焼状態

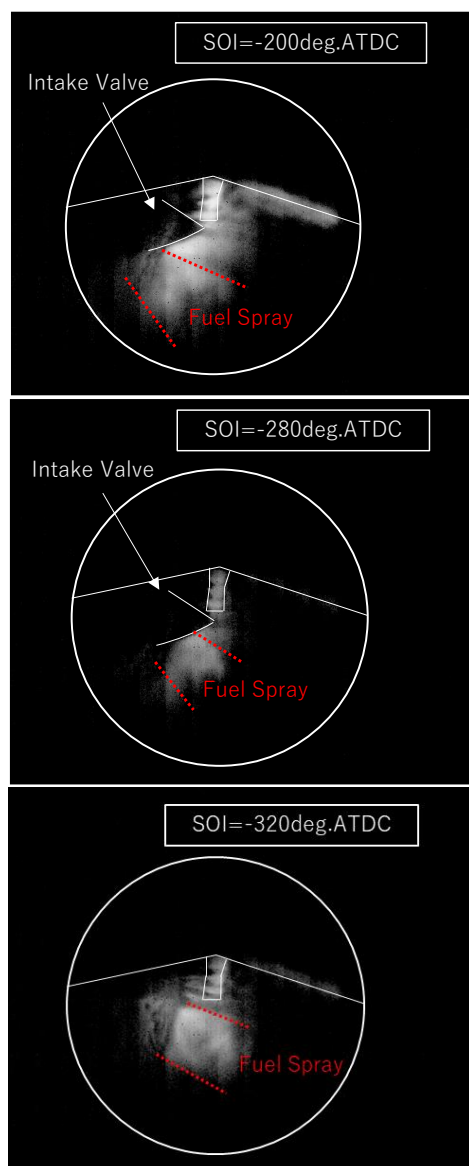


図 6 燃料噴射開始時期ごとの燃料噴霧

#### 4. まとめ

本研究では直噴ガソリンエンジンの微粒子生成モデル構築に必要な様々な運転環境下での実機検証データ収集を可能とするエンジン計測システムの構築を行った。新機能である可視化に関する先行実験で得られた知見を以下にまとめる。

ハイスピードカメラとレーザー照明を用いて噴霧及び燃焼を撮影することに成功した。しかし、長時間又は複数に渡り撮影を行う場合、燃焼排出物によりガラス窓に汚れが付着した。本試験では燃焼排出物の少ない条件から開始し、最低限の燃焼回数で行う必要がある。

#### 5. 今後の予定

3次元反応流体計算(3D-CFD計算)が容易なフラットピストンと燃料を5成分ガソリン模擬燃料に変更し、前報<sup>③</sup>までのすす質量濃度、個数濃度と比較し再現性を確認する必要がある。そして、すす粒子排出特性を解明とCFD計算をする上で重要となる壁面温度計測をすす粒子計測と同時に行っていく。今回の可視化機能の追加によって筒内挙動とPM/PN排出特性との関係を調べる事が可能になった。

#### 参考文献

- 1) 中央環境審議会, 今後の自動車排ガス低減対策のあり方について(第十四次答申), (2020)[http://www.env.go.jp/air/mat01\\_9\\_2.pdf](http://www.env.go.jp/air/mat01_9_2.pdf) (参照 2021-10-07)
- 2) 秋濱一弘, 粒子状物質(PM):自動車排出ガス規制とPM生成モデリングの必要性・直噴ガソリンエンジン/乗用車を中心に-, 日本燃焼学会誌, Vol.59, No.87, pp. 49-54, 2017.
- 3) 有川純一, 金尚明, 窪山達也, 森吉泰生, 橋本淳, 小橋好充, 秋濱一弘: サロゲート燃料を用いたガソリン直噴エンジンの微粒子排出特性に関する研究 - 負荷と空燃比が微粒子排出特性に及ぼす影響 -, 第31回内燃機関シンポジウム, 2020.11.16-18