

# サロゲート燃料を用いたガソリン直噴エンジンの 微粒子排出特性に及ぼす冷却水温度と筒内流動の影響

日大生産工(院) ○有川 純一  
千葉大 窪山 達也  
日大生産工 山崎 博司 今村 幸 秋濱 一弘

## 1. まえがき

二酸化炭素排出量を低減するため、内燃機関の熱効率改善が求められており、燃料の直接噴射方式が広く採用されている。しかしポート燃料噴射式ガソリン機関に対し、直接噴射式ガソリン機関では粒子状物質が多く発生することが問題点として挙げられ、排出微粒子の排出濃度や数濃度を低減する必要がある。Particulate Number (PN) 規制が強化され、この規制を満すために微粒子生成を抑制する技術開発が求められている<sup>(1)</sup>。しかしながら微粒子生成過程を実験的な手法のみで明らかにすることは難しく、数値シミュレーションの活用が欠かせない。そこで現在、直接噴射式ガソリン機関からの排出微粒子(主にすす)の予測モデルの構築が進められており、微粒子生成モデルの実機検証データが必要となる<sup>(2)</sup>。そこで本研究では市販ガソリンの物理的・化学的な特性を模擬できるサロゲート燃料を用いて、直接噴射式ガソリン機関における微粒子排出特性を明らかにするとともに、市販レギュラーガソリンとの比較を行い、数値計算の検証用データベースとしての妥当性・有効性の検証を行った。

## 2. 実験方法および測定方法

本研究では、単気筒直噴ガソリンエンジンを用いた。エンジンの仕様を表1に示す。供試機関のボア径は79.7mm、ストロークは81.1mm、排気量は404cm<sup>3</sup>である。圧縮比は9.55で、ピストン形状は燃料噴霧の誘導性が低いフラットピストンを用いた。ガソリン機関の微粒子生成モデルを構築するためには、実機の微粒子データを取得する必要がある。排出すす質量濃度の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168倍に希釈している。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 (PAU-AZW 8000 SE-HC, APISTE) を用いて、冷却水温度を制御した。供試機関、圧力センサー、排出ガス計測およびチラーなど各装置の概略を図1に示す。

表1 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	9.55
Type of piston	Flat piston

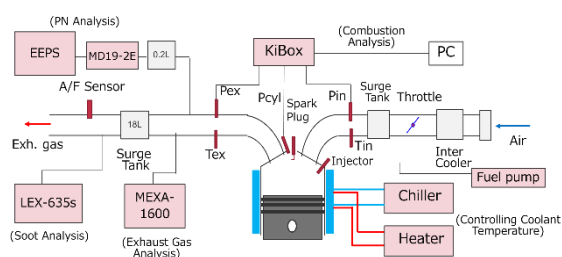


Fig.1 実験装置概略図

実験条件を表2に示す。エンジン回転数は1200rpm、吸気温度は30°Cで一定とした。エンジンの負荷（グロス図示平均有効圧力, IMEP<sub>gross</sub>）と燃焼位相（CA50）および空気過剰率を、それぞれ0.7MPa, 9deg.ATDCおよび

Effects of Coolant Temperature and In-cylinder Flow on Particulate Characteristics from Gasoline Direct Injection Engine with Surrogate fuel

Junichi ARIKAWA, Tatsuya KUBOYAMA, Hiroshi YAMASAKI  
Osamu IMAMURA and Kazuhiro AKIHAMA

び1.0で一定とした。チラーを用いて冷却水温度を8°Cから80°Cまで変化させることで、冷却水温度が排出物質特性に及ぼす影響を調べた。燃料噴射開始時期(SOI)は、吸気行程初期(-320deg.ATDC)から圧縮行程途中(-80deg.ATDC)まで変化させた。燃料噴射圧力は20MPaで一定である。燃焼を促進させるタンプルポートを付けた状態をベースとし、タンプルポートを外した状態(冷却水温度8°C)と比較することで筒内流動の影響を調べた。

市販ガソリン燃料は様々な種類の炭化水素から構成されており、全ての成分を考慮した数値シミュレーションや実験解析は困難である。そこで構成化学種数を減らしながら、市販ガソリンの微粒子排出特性を定性・定量的に再現することを狙ったサロゲート燃料が提案された<sup>(3)</sup>。本研究では、iso-pentane, iso-octane, n-heptane, toluene, 1,2,4-trimethyl benzeneの5成分で構成されたサロゲート燃料(以下、サロゲート燃料Vと称す)を用い、市販のレギュラーガソリンとのすすの排出特性を比較した。表3に試験用燃料の性状を示す。

表2 実験条件

Engine speed	1200 rpm
Intake air temperature	30 °C
Gross IMEP	0.7 MPa
CA50	9 deg. ATDC
Excess air ratio	1.0
Start of fuel injection (SOI)	-320 ~ -80 deg. ATDC
Coolant temperature	8°C, 20°C, 30°C, 60°C, 80°C
Tumble port	With/Without

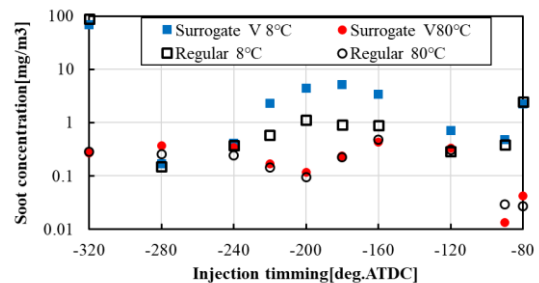
表3 サロゲート燃料Vの性状

Component	Vd.% in fuel
iso-Pentane	45
iso-octane	20
n-heptane	10
toluene	10
1,2,4 trimethyl benzene	15
RON / MON	89.8 / 86.1

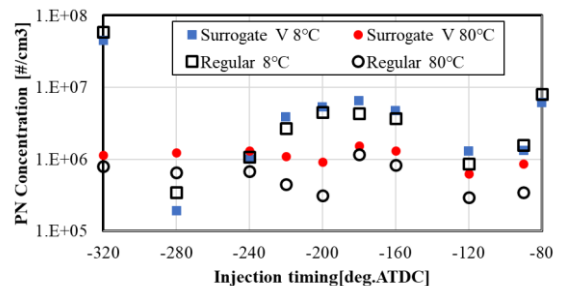
### 3. 実験結果および検討

#### 3.1 サロゲート燃料Vと市販ガソリンの比較

燃料噴射開始時期(SOI)は吸気行程初期(-320deg.ATDC)から圧縮行程途中(-80deg.ATDC)とし冷却水温度を8°C, 80°Cに変化させて実験を行った。各燃料の噴射時期に対する排出すす濃度および微粒子個数濃度(粒径分布から積分した全粒子数)の比較を図2の(a)と(b)に示す。冷却水温度8°Cの場合、下死点付近の燃料噴射時期(-220~-160deg.ATDC)において、サロゲート燃料Vと市販ガソリンの排出すす濃度に相違がみられる。しかし、他の噴射時期および冷却水温度80°Cの全ての条件において、サロゲート燃料Vの排出すす濃度と微粒子個数濃度は市販ガソリンの排出特性を定量的に再現できていることがわかる。冷却水温度8°Cと80°Cの同じ噴射時期における微粒子の粒径分布を図3の(a)と(b)に示す。供試燃料によらず、冷却水温度が低いほど粒子数が高く、サロゲート燃料Vと市販ガソリンの粒径分布が概ね一致する傾向が得られた。一方、冷却水温度が高い条件では粒子数が低く、粒径分布に相対的な差が見受けられるが、市販ガソリンの微粒子特性を概ね模擬できていることがわかる。

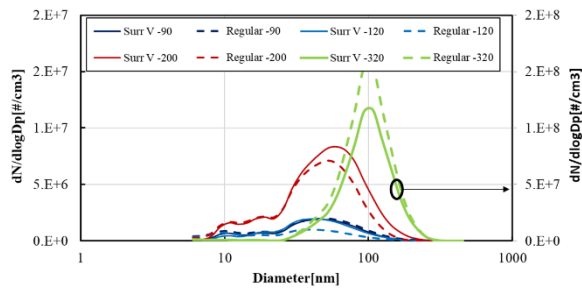


(a) 排出すす濃度

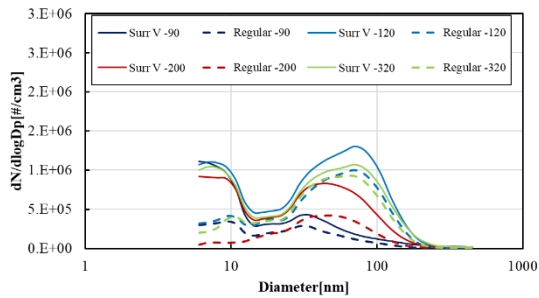


(b) 微粒子個数濃度

Fig.2 サロゲート燃料Vと市販ガソリンによる比較



(a) 冷却水温度 8°C



(b) 冷却水温度 80°C

Fig.3 サロゲート燃料Vと市販ガソリンにおける粒径分布の比較

### 3.2 サロゲート燃料Vと市販ガソリンとの関係

サロゲート燃料Vが市販ガソリンの微粒子排出特性を模擬できるかに関してさらに検討を行った。排出すす濃度と微粒子個数濃度(粒径分布を積分した全粒子数)の相関を調べた。図4と図5に3.1節で示した全ての実測データに関するサロゲート燃料Vと市販ガソリンの相関関係を示す。排出すす濃度( $R^2=0.759$ )と微粒子個数濃度( $R^2=0.732$ )において、どちらも高い相関を示していることがわかる。以上の結果よりサロゲート燃料Vは市販ガソリンの微粒子排出特性を模擬でき、数値計算の検証データベースとしての妥当性・有効性が実証された。

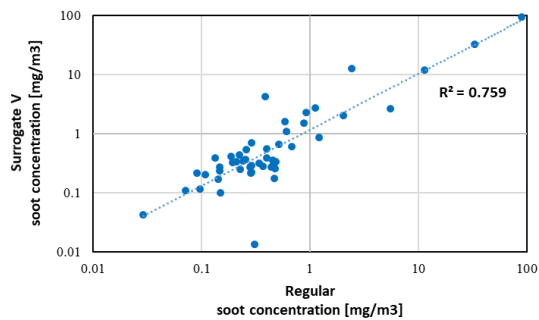


Fig.4 サロゲート燃料Vと市販ガソリンにおける排出すす濃度の相関性

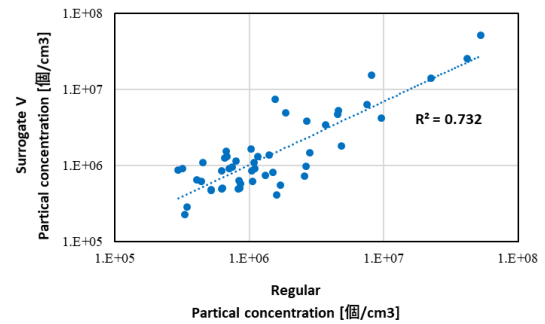


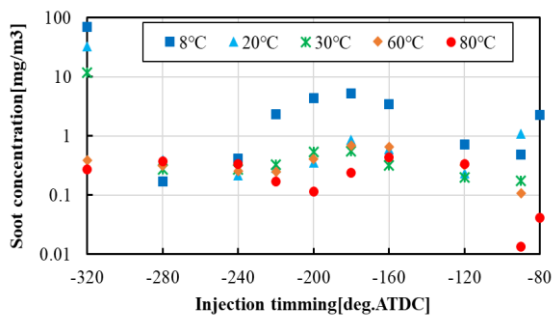
Fig.5 サロゲート燃料Vと市販ガソリンにおける微粒子個数濃度の相関性

### 3.3 微粒子排出に及ぼす冷却水温度と筒内流動の影響

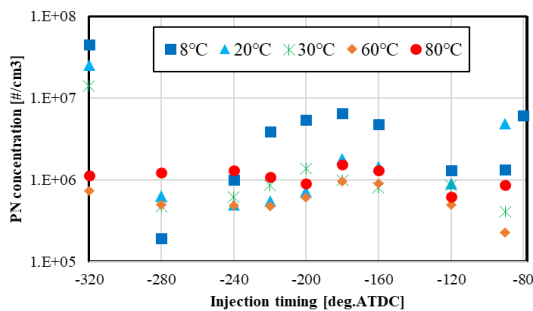
市販ガソリンを模擬しうるサロゲート燃料Vを用いて、燃料噴射時期と冷却水温度が微粒子排出特性に及ぼす影響をより詳細に調べた。燃料噴射時期は前節と同じ条件とし、冷却水温度を8°C、20°C、30°C、60°C、80°Cと5水準を増やして変化させた。燃料噴射時期および冷却水温度が、排出すす濃度および微粒子個数濃度に及ぼす影響を図6の(a)と(b)に示す。冷却水温度が高い60°Cと80°Cの条件では、燃料噴射時期によらず、排出すす濃度および微粒子個数濃度が低い。これに対して、冷却水温度が低い8°C、20°C、30°Cの条件では噴射時期が微粒子排出に及ぼす影響が顕著になり、吸気行程前半(-280deg.ATDCよりも早く)と圧縮行程後半(-80deg.ATDC付近)の燃料噴射の場合に微粒子排出濃度が増大する。これは、吸気行程前半および圧縮行程後半に噴射された燃料がピストンに衝突し、液膜が形成されるためと考えられる。高温条件と比べると低温条件では壁面温度が低く、衝突した燃料が気化しにくく、残存液膜量が多いと考える。

また、冷却水温度が8°Cの条件では、下死点付近(-220deg.ATDC~-160deg.ATDC)で燃料を噴射すると、排出すす濃度が増加していることがわかる。下死点付近の燃料噴射では壁面での液膜生成が考えられる。そこで筒内の流動が燃料の壁面付着に関係していると推察し、タンブルを強化するタンブルポートの有無による排出すす濃度の比較を行った。図7にタンブルが排出すす濃度に及ぼす影響を示す。図より、タンブルポートの有無によって、噴射時期に対する排出すす濃度の特性が異なることがわかる。タンブ

ルポートが装着された場合 (図中点線), 下死点付近で排出すす濃度が増加するのに対して, タンブルポートが装着されていない場合 (図中実線), 排出すす濃度が増加する噴射時期が, 圧縮行程前半に移動した. 以上の結果より下死点付近での排出すす濃度増加は噴射した燃料がタンブルポートによって強化された吸入空気に流され, 筒内の壁面付着を引き起こしたためと推察する. またタンブルポートを外した場合に排出すす濃度が増加する噴射時期が圧縮行程前半に移動したのは流動が弱まったことによる空気と燃料の不均一混合が起因していると考えられる.



(a) 排出すす濃度



(b) 微粒子個数濃度

Fig.6 サロゲート燃料 V における冷却水温度の影響

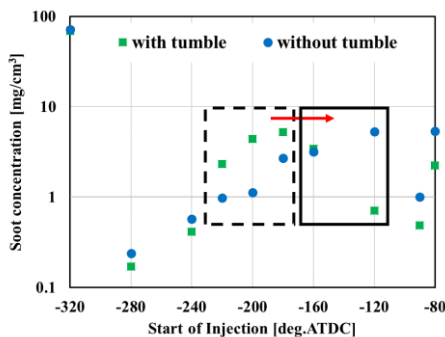


Fig.7 サロゲート燃料 V による排出すす濃度への筒内流動の影響

#### 4. まとめ

本研究では, 直接噴射式ガソリン機関の微粒

子排出特性を明らかにするとともに, 微粒子生成モデルの実機検証に用いるためのデータベースを構築することを目的に, 市販のガソリン燃料を模擬できる5成分のサロゲート燃料を用いて, 冷却水温度と燃料噴射時期, タンブル強度が微粒子排出特性に及ぼす影響について調べた. 得られた知見を以下にまとめる.

1. 本研究で用いた iso-pentane, iso-octane, n-heptane, toluene, 1, 2, 4-trimethyl benzene の5成分のサロゲート燃料は, 市販のガソリン燃料の排出すす濃度および微粒子個数濃度を定量的に模擬することが分かった.
2. 5成分のサロゲート燃料, 市販のガソリン燃料のいずれの燃料を用いた場合も, 冷却水温度が低いほど排出すす濃度および粒子数濃度が高くなる.
3. サロゲート燃料を用いて詳細な検討を実施した. 冷却水温度が低い条件では, 下死点付近で燃料噴射を開始すると, 排出すす濃度および微粒子個数濃度が増加した.
4. タンブル強度を変化させると, 排出すす濃度, 微粒子個数濃度および微粒子濃度分布が変化し, 微粒子排出量が増大する燃料噴射時期が遅角化した. 下死点付近の燃料噴射においては筒内の燃料液膜形成状況に対して筒内流動の影響があると推察された.

#### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 熊仔, 武田拓也, 窪山達也, 森吉泰生, 秋濱一弘, 橋本淳, 鈴木央一:直噴ガソリンエンジンのすすと微粒子の計測方法改善に関する研究, 自動車技術会 2018 年春季大会 学術講演会, 2018.5.
- (3) 田中万里子, 永田勇氣, 石井一洋, 小橋好充:反射衝撃波 背後におけるガソリンサロゲート燃料の煤生成に及ぼす 当量比の影響, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017. 11