

燃料中の芳香族成分が直噴ガソリンエンジンの 排出微粒子特性に及ぼす影響

日大生産工(院) ○長谷川 舜一
千葉大学 大塚 翔太・窪山 達也・森吉 泰生
日大生産工 秋濱 一弘

1. まえがき

ガソリンエンジンの熱効率向上技術のため、直噴ガソリンエンジンが広く採用されている。しかし、ポート噴射式に比べると混合気の不均一性、コールドスタート時の触媒活性化のために上死点付近での燃料噴射に伴う燃料の壁面付着などが避けられない¹⁾。この結果、直噴エンジンでは、すす粒子を主とした粒子状物質 (PM, Particulate Matter) が多く排出されることが問題として挙げられ、排出微粒子の質量や個数を低減する必要がある。

年々規制が強化されており、2025年にはユーロ7が施行される予定である。このような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。

日本では、2050年までにカーボンニュートラルを目指しており、大気中から回収された二酸化炭素 (CO₂) と再生可能エネルギーにより生成された水素 (H₂) を人工的に合成した燃料「e-fuel」の開発が進められおり、様々な燃料製造が期待されている²⁾。その中にフィッシャー・トロプシュ法によるガソリン製造がある。この方法では、微粒子が生成しやすい芳香族含有量が少ないガソリンが製造可能である。したがって、燃料中の芳香族成分がガソリンエンジンの排出微粒子特性に及ぼす影響を先行的に調べることが必要と考えられる。

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 (PM5) と芳香族を含まない iso-octane を用い、直噴ガソリンエンジンにおける微粒子排出特性を明らかにするとともに、両者を比較することで、燃料中に含まれる芳香族成分が排出微粒子特性に及ぼす影響を調査した。

2. 供試エンジン及び装置概要

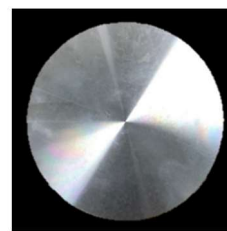
2.1 エンジン計測システム

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81.8mm、排気量は404.6 cm³である。圧縮比は11.2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。Fig. 1に (a)量産型ピストンと(b)フラットピストンの形状を示す。

Table 1 エンジン仕様

Engine type	single cylinder
Fuel injection system	Side-mounted direct injection
Displacement	404.6 cm ³
Bore × stroke	79.7 mm × 81.1 mm
Compression ratio	11.2
Type of piston	Flat piston



(a)量産型ピストン (b)フラットピストン

Fig.1 ピストン形状

排出微粒子特性の測定およびエンジンシステム全体概要を以下で説明する。

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 (POROUS TUBE THERMODILUTER MODEL 3098) を利用した。粒子数濃度の計測において、希釈装置により排出ガスを140倍に希釈している。供試機関、圧力センサー、排出ガス計測など各装置の概略をFig. 2に示す。

The Effect of Aromatic Components in Fuel on Particulate Emission
Characteristics of Direct-Injection Gasoline Engine

Shunichi HASEGAWA, Shota OTSUKA, Tatsuya KUBOYAMA, Yasuo
MORIYOSHI and Kazuhiro AKIHAMA

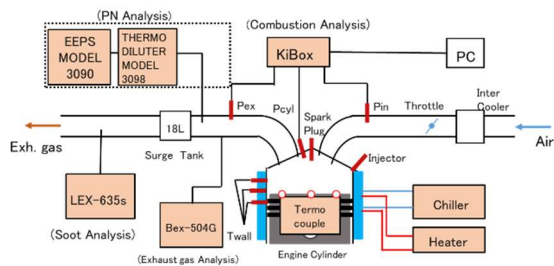


Fig.2 実験装置概略図

2.2 微粒子計測システム

2.2.1 光学式スモークメータ

微粒子の質量濃度計測には光学式スモークメータ Lex-635s を用いた。検出部の概略図を Fig.3 に示す。検出部に導入されたサンプルガス中にレーザー光を入射し、微粒子によって生じる散乱光強度(光散乱法)と透過光強度(光減衰法)を同時に計測する。微粒子の中高濃度域では計測の信頼性が高い光減衰法による計測を行い、低濃度域では感度が優れている光散乱法によって計測される。

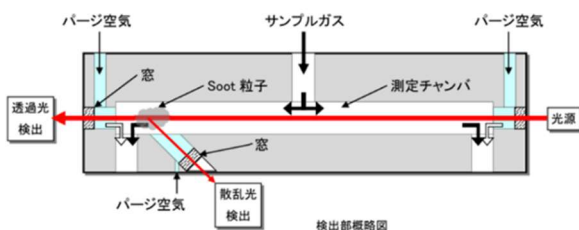


Fig.3 煤煙測定管の概略図

2.2.2 リアルタイム自排微粒子解析装置

EEPS は 5.6nm~560nm の粒径範囲において合計 32ch(1decade:16ch)の分解能で計測される。ここでチャンネルとは 1decade を何分割しているかを表している。また、1decade とは 10nm~100nm, 100nm~1000nm というようにある値を 10 倍した値の範囲を指している。

Fig.4 に EEPS3090 の構成を示す。まず、希釈器(POROUS TUBE THERMODILUTER MODEL 3098)によって希釈されたサンプル粒子は粗大粒子を除去するサイクロンを通過する。そして、1 μ m 以下の粒子のみチャージャー部へ運ばれ、チャージャー部へ運ばれた粒子はプラスに荷電される。さらに運ばれた粒子は中央にあるプラスの電荷を持った高電圧ロッドによって反発し、外側の多段エレクトロメーターで捕集・検出される。検出された粒子の分級は粒子の持つ電気移動度によって行われる。小さな粒子は電

気移動度が大きいいため上段のエレクトロメーターで捕集されるのに対し、大きな粒子は電気移動度が小さいため下段のエレクトロメーターで捕集される。捕集された粒子は電極に付着し付着量によって生じた電位差を粒子濃度へ変換することで粒径分布が得られる。

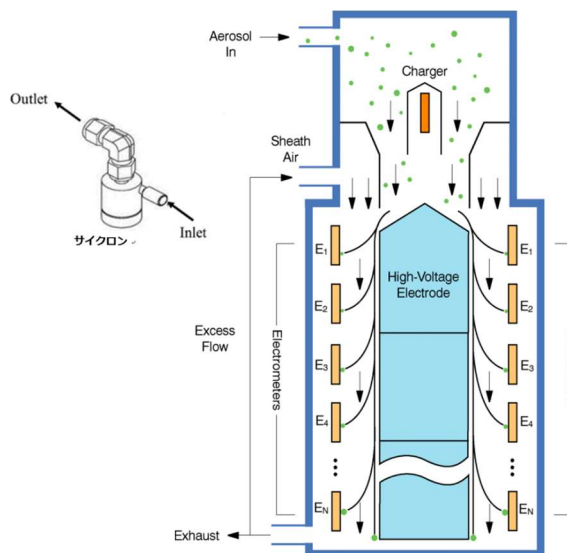


Fig.4 EEPS モデル3090の概略図

3. 実験方法

実験条件を表2に示す。エンジン回転数、エンジン負荷(グロス図示平均有効圧力, IMEP_{gross})、空気過剰率、吸気温度、燃焼位相、冷却水温度は一定とした。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(-60deg.ATDC)まで変化させた。燃料噴射圧力は20MPaで一定である。また、燃料中に芳香族を含むガソリンサロゲート燃料PM5と芳香族を含まないiso-octaneの2種類の燃料で実験を行い、芳香族が排出微粒子特性に与える影響を調査した。

PM5の成分を表3に示す。燃料に含まれる芳香族は、tolueneと1,2,4-TMB (Trimethyl benzene)である。また表4は各成分のオクタン価である。実験に使用したPM5のRON(リサーチオクタン価)は約90で市販レギュラーガソリンと同等である。またiso-octaneのRONは100で、プレミアムガソリン相当であり、共にエンジン運転が可能な燃料である。

Fig.5 は PM5 の蒸留特性である。市販レギュラーガソリンの蒸留特性と同等である。また、iso-octane の沸点は 99°C であり、市販ガソリンの 50%留出温度に相当する。

Table 2 実験条件

Engine speed	1000 [rpm]
IMEP gross	500[kPa]
Excess air ratio	1
Coolant temperature	80 [°C]
Oil cooler	5 [°C]
Fuel type	PM5, iso-octane
Fuel injection	DI (Direct Injection)
Injection timing	-320~-60[deg.ATDC]
Ignition timing	10[deg.ATDC] for CA50
Cylinder flow	With tumble port

Table 3 PM5 の成分³⁾

Hydrocarbons	Boiling point[°C]	Vol.% in fuel
iso-pentane	28	45
n-heptane	98	10
iso-octane	99	20
toluene	111	10
1,2,4-TMB	169	15

Table 4 各成分のオクタン価

Hydrocarbons	RON	MON
iso-pentane	92.3	90.3
n-heptane	0	0
iso-octane	100	100
toluene	120.1	103.5
1,2,4-TMB	110.5	103.5
PM5	89.8	86.1

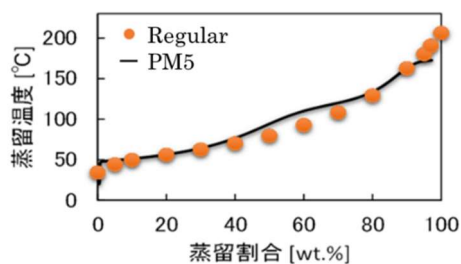


Fig.5 蒸留曲線⁴⁾

4. 結果

燃料噴射開始時期 (SOI) は吸気行程初期 (-320deg. ATDC) から圧縮行程後半 (-60deg. ATDC) へ変化させて実験を行った. Fig. 6及びFig. 7は排出微粒子 (主にsoot:すす) の質量濃度と個数濃度 (PN: Particulate Number) と噴射開始時期の関係を示す. 質量濃度と個数濃度は共に吸気行程前半, 圧縮行程後半で増加している. また, PM5においてはiso-octaneよりも増加傾

向にある. PM5には高沸点成分である1,2,4-Trimethylbenzeneが含まれているためiso-octane 100%に比べ揮発しにくく液膜を形成しやすいことからすすを多く生成しやすい. また, ピストンが上死点付近にあるSOI:-320deg. ATDCでは燃料がピストン頂面に当たり液膜が形成される. 加えて, 筒内が空気により冷やされ揮発しにくくなる. 一方, SOI:-60deg. ATDCでは筒内圧が高く, ピストン頂面温度も高いので, SOI:-320deg. ATDCに比べすすは少ないが, 空気と燃料の混合時間が短いため, 筒内には局所的に燃料が濃い混合気が形成されやすく,すすが多く生成される. 比較的燃料蒸発が進んでいるSOI:-60deg. ATDCでPM5の方がすすが多いことから, 芳香族の有無がすす生成に影響していると考えられる.

Fig. 8~12は各噴射時期における排出微粒子の粒径分布を比較したものである. Fig. 8~12から全体的にPM5がiso-octaneより多く微粒子を排出しており, 燃料中の芳香族が影響していると考えられる. また, Fig. 7のような液膜燃焼が発生しやすい噴射時期では, 芳香族の影響を受けやすく, 排出微粒子が増加する. またPM5の排出微粒子の粒径分布は, 特にSOI:-320deg. ATDCと-60deg. ATDCにおいて, 大粒径化していることが分かる. 燃料中の芳香族がすすの粒子成長を促進している可能性がある. このように燃料中の芳香族成分が直噴ガソリンエンジンの排出微粒子特性に及ぼす影響及び粒径分布に及ぼす影響を確認できた.

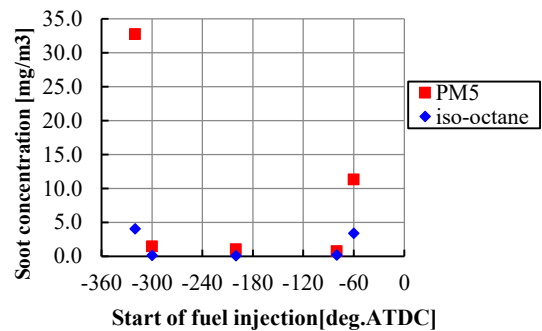


Fig.6 Sootと噴射開始時期の関係

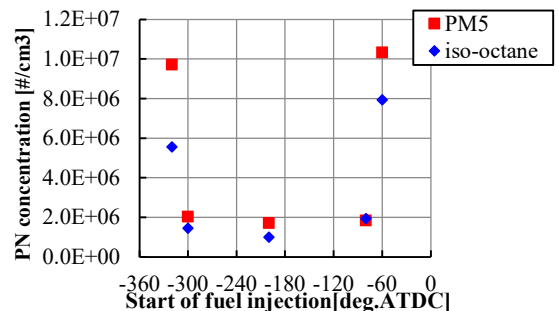


Fig.7 PN Concentrationと噴射開始時期の関係

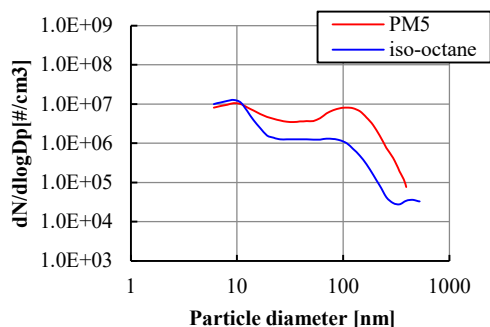


Fig.8 SOI:-320deg.ATDCにおける粒径分布

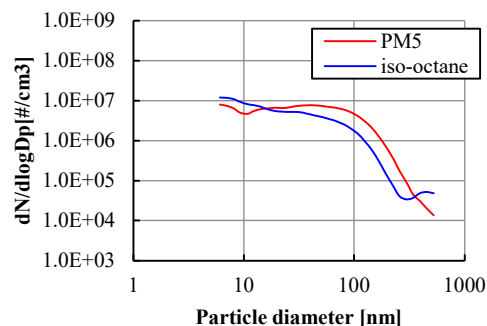


Fig.12 SOI:-60deg.ATDCにおける粒径分布

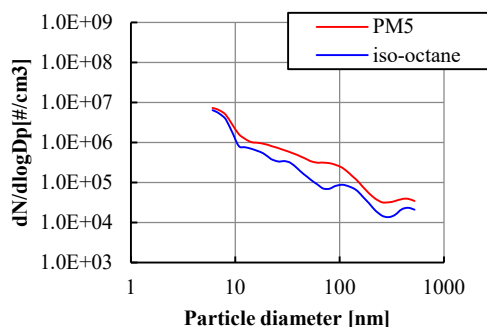


Fig.9 SOI:-300deg.ATDCにおける粒径分布

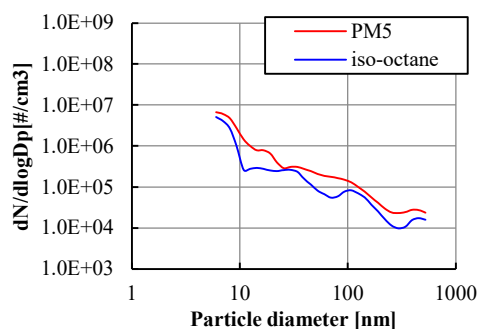


Fig.10 SOI:-200deg.ATDCにおける粒径分布

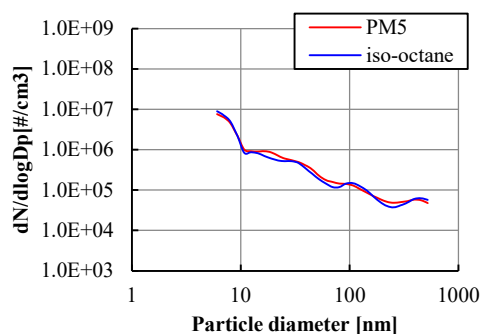


Fig.11 SOI:-80deg.ATDCにおける粒径分布

5. まとめ

本研究では直噴ガソリンエンジンにおける、燃料中に含まれる芳香族が微粒子生成に及ぼす影響を調査した。ピストンが下死点付近で燃料を噴射した際は質量濃度、個数濃度、粒径分布では殆ど変化が見られなかったが、吸気行程前半及び圧縮行程後半のような、燃料が壁面に付着し燃焼する液膜燃焼、燃料の混合時間が短いことによる燃料の不均一混合が起こる条件においてPM5のすす生成量が増加した。本試験では、iso-octaneで微粒子排出量がPM5に比べて低減したことから、芳香族の影響を確かめることができたと考える。

参考文献

- 1) 森吉泰生, 橋本淳, 小林佳弘, ガソリンエンジンにおける粒子状物質の生成, 日本燃焼学会誌, Vol. 56, No.178 (2014) pp.298-307.
- 2) 経済産業省自然エネルギー庁, エンジン車でも脱炭素? グリーンな液体燃料「合成燃料」とは, (2021) https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/gosei_nenryo.html, (参照 2023-10-09)
- 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)
- 4) 秋濱一弘, 窪山達也, 橋本淳, JSAE Engine Review, すす粒子生成モデルとエンジン筒内すす生成予測への挑戦, https://www.jsae.or.jp/engine_rev/backnumber/12-08/sip_01.html, (参照 2023-10-09)